

BRUNO AKIHIRO TANNO IAMAMURA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO
MAGNÉTICO PARA TESTE DE ESTADORES**

FLORIANÓPOLIS

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO
MAGNÉTICO PARA TESTE DE ESTADORES**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

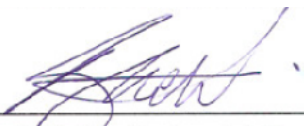
BRUNO AKIHIRO TANNO IAMAMURA

Florianópolis, Agosto de 2008.


DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO MAGNÉTICO PARA TESTE DE ESTADORES

Bruno Akihiro Tanno Iamamura

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’




Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Orientador



Prof.ª Kátia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



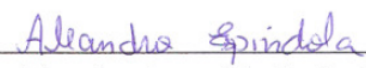
Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Presidente



Prof. Renato Carlson, Dr.
Co-Orientador



Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.



Eng. Aleandro Amauri de Espínola, Mestre – EMBRACO



Prof. Pedro Armando da Silva Júnior, Dr. – CEFET/SC



Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.

Dedico este trabalho a toda minha família, pelo apoio e compreensão oferecidos durante toda a sua realização, em especial:

aos meus pais, Walter e Margareth;

aos meus irmãos, Danielle e Walter;

e a minha namorada, Juliana, que sempre esteve trabalhando ao meu lado.

Agradecimento

Este trabalho é fruto da colaboração de diversas pessoas, entidades e empresas as quais gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, Prof. Nelson Sadowski, por ter me proporcionado a oportunidade de realizar esta dissertação e, principalmente, pelo tempo, paciência e conhecimento concedidos;

Ao meu co-orientador, Prof. Renato Carlson, pelas sugestões fornecidas;

Aos professores do Grucad por compartilharem seus conhecimentos e, acima de tudo proporcionarem um ambiente agradável e harmonioso para o desenvolvimento desta dissertação;

Ao professor Nelson Jhoe Batistela, pela oportunidade concedida de ingressar neste laboratório;

À amiga Celly D. Melo, secretária executiva do Grucad, pela atenção e prontidão sempre concedidas;

Aos demais professores membros da banca de avaliação, Patrick Kuo-Peng e Pedro Armando da Silva Júnior, pelas discussões e sugestões que contribuíram com a finalização do trabalho;

Aos colegas do Grucad sempre dispostos a ajudar;

Agradeço em especial à Juliana Luísa Müller, pela atenção, dedicação e paciência, auxiliando na elaboração deste trabalho, bem como toda a revisão desta dissertação;

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido;

À FINEP, pela aprovação e suporte concedido ao projeto;

À empresa EMBRACO pelo suporte financeiro, pela fabricação do protótipo e pelo fornecimento das amostras para realização dos ensaios; em particular ao engenheiro Aleandro A. Espíndola, sempre tão solícito e que fez parte da banca de avaliação;

À minha família pelo suporte emocional e por sempre me apoiarem a sempre estar aprendendo;

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO MAGNÉTICO PARA TESTE DE ESTADORES

Bruno Akihiro Tanno Iamamura

Agosto/2008

Orientador: Nelson Sadowski, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: Perdas rotativas em aços elétricos, ferramenta de testes, máquinas elétricas.

Número de Páginas: 90

RESUMO: A dissertação trata do desenvolvimento e da implementação de um dispositivo magnético capaz de aplicar campos rotacionais sobre estadores. O projeto no qual este trabalho está inserido pretende auxiliar na escolha de aços para fins elétricos para máquinas rotativas e, além disso, aferir na linha de produção a qualidade dos estadores produzidos. Inicialmente foram feitos alguns estudos: das influências dos campos rotacionais nas máquinas rotativas; da bancada desenvolvida que aplica campos rotacionais em chapas únicas, e que foi adaptada para acoplar o novo dispositivo magnético; e do dispositivo que aplica campos alternantes sobre os estadores, no qual o desenvolvimento do novo dispositivo foi baseado. Para desenvolver o novo dispositivo magnético foram necessários cálculos de vários projetos, até que se conseguisse um que cumprisse os requisitos necessários. Por fim, confeccionou-se o dispositivo e fez-se uma avaliação prática. Os resultados obtidos comprovaram que a nova ferramenta funcionou conforme as especificações.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements of the degree of Master in Electrical Engineering.

DEVELOPMENT OF A MAGNETIC DEVICE FOR TESTING ELECTRICAL MACHINES STATORS

Bruno Akihiro Tanno Iamamura

August/2008

Advisor: Nelson Sadowski, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Rotational iron losses, testing tool, electrical machines.

Number of Pages: 90

ABSTRACT: This dissertation deals with the development and implementation of a magnetic device capable of applying rotational fields on stators. The project in which this work is inserted intends to assist in the choice of electric steel for machine manufacturing and, also, to measure the quality of stators in the production line. Initially some studies have been made, such as: the influence of rotational fields in electrical machines; the rotational single sheet test workbench, which was adapted to attach the new magnetic device, and the device that applies alternating fields on stators, on which the new device was based. For the development of the new device it was necessary to perform magnetic calculations on many projects, until one of them met the necessary requirements. Finally, the new device was built and tested. The results proved that the new tool worked as intended.

Sumário

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	IX
ABREVIATURAS	X
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 POSICIONAMENTO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS E MÉTODOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 AÇO ELÉTRICO.....	3
2.2 CAMPOS ROTACIONAIS	4
2.3 FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS.....	7
2.4 BANCADA PARA CAMPOS ROTACIONAIS	9
3. BANCADA DE TESTES ROTACIONAIS	11
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
3.2 ALTERAÇÃO DA PARTE MAGNÉTICA DA BANCADA	14
3.3 SUBSTITUIÇÃO DOS SENSORES DE CAMPO E INDUÇÃO	15
3.4 ALTERAÇÃO DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS	15
4. TESTADOR DE NÚCLEO	20
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	20
4.2 ENSAIO DOS ESTADORES	21
4.3 SIMULAÇÃO DO TESTADOR DE NÚCLEO.....	22
4.3.1 <i>Carta de indução do Testador de núcleo</i>	23
4.3.2 <i>Linhas de fluxo magnético do testador de núcleo</i>	24
4.3.3 <i>Variação do entreferro</i>	24
4.4 ENSAIOS REALIZADOS NO GRUCAD	26
4.4.1 <i>Sensores de indução</i>	26
4.4.2 <i>Ensaio de elevação de tensão</i>	27
4.4.3 <i>Ensaio do valor de indução na coroa do estator</i>	29
4.4.4 <i>Ensaio do valor de indução nos dentes do estator</i>	32
5. PROJETO DE UM NOVO DISPOSITIVO	36
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
5.2 FORMAÇÃO DO CAMPO GIRANTE.....	37
5.3 OS ENROLAMENTOS E AS RANHURAS	37
5.4 O MATERIAL.....	40
5.5 MONTAGEM	41
5.6 PROJETOS.....	42
5.6.1 <i>Projeto 1</i>	43
5.6.2 <i>Projeto 2</i>	46
5.6.3 <i>Projeto 3</i>	48
5.6.4 <i>Projetos 4 – 5 – 6 – 7 – 8</i>	50

5.7	PROJETO FINAL.....	53
5.7.1	<i>Simulação</i>	53
5.7.2	<i>Variação do entreferro</i>	55
5.7.3	<i>Bobinagem</i>	58
6.	ENSAIO DO PROTÓTIPO	60
6.1	ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TENSÃO	61
6.1.1	<i>Excitação em “x”</i>	62
6.1.2	<i>Excitação em “y”</i>	63
6.1.3	<i>Excitação em “x” e em “y”</i>	65
6.2	ENSAIO DO VALOR DE INDUÇÃO MAGNÉTICA NA COROA DO ESTATOR.....	68
6.2.1	<i>Excitação em “x”</i>	68
6.2.2	<i>Excitação em “y”</i>	70
6.2.3	<i>Excitação em “x” e em “y”</i>	71
6.3	ENSAIO DO VALOR DE INDUÇÃO NOS DENTES DO ESTATOR	72
6.3.1	<i>Excitação em “x”</i>	72
6.3.2	<i>Excitação em “y”</i>	75
6.3.3	<i>Excitação em “x” e em “y”</i>	78
7.	CONCLUSÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	82
7.1	CONCLUSÕES FINAIS	82
7.2	PERSPECTIVAS	84
8.	ANEXOS	85
8.1	CURVA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO DO AÇO E230	85
8.2	COTAS DO ESTATOR SIMULADO E UTILIZADO NOS TESTES PRÁTICOS.....	86
8.3	RESULTADO DO ENSAIO DE EPSTEIN DO AÇO E230 UTILIZADO NOS TESTES PRÁTICOS	87
8.4	CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DA FORÇA MAGNETOMOTRIZ	88
8.5	COTAS DO NOVO DISPOSITIVO MAGNÉTICO	89
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

Lista de Siglas e Símbolos

B	- Indução magnética	[T]
Br	- Indução magnética no sentido radial	[T]
Bt	- Indução magnética no sentido transversal	[T]
H	- Campo magnético	[A/m]
I	- Corrente do enrolamento primário	[A]
I _{rms}	- Corrente eficaz	[A]
I _x	- Corrente no eixo “x”	[A]
I _{xrms}	- Corrente eficaz no eixo “x”	[A]
I _y	- Corrente no eixo “y”	[A]
I _{yrms}	- Corrente eficaz no eixo “y”	[A]
N	- Número de espiras	[espiras]
S	- Área de secção transversal	[m ²]
t	- Tempo	[s]
T	- Período de um ciclo do sinal	[s]
U(t)	- Tensão em função do tempo	[V]
V	- Tensão do enrolamento secundário	[V]
V _{rms}	- Tensão eficaz	[V]
V _x	- Tensão no eixo “x”	[V]
V _{xrms}	- Tensão eficaz no eixo “x”	[V]
V _y	- Tensão no eixo “y”	[V]
V _{yrms}	- Tensão eficaz no eixo “y”	[V]
Wh	- Perda magnética devido ao campo alternante	[W/Kg]
Wr	- Perda magnética devido ao campo rotacional	[W/Kg]

Abreviaturas

GRUCAD	- Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos.
EMBRACO	- Empresa Brasileira de Compressores.
GO	- Grão Orientado.
GNO	- Grão Não Orientado.
PWM	- Modulação por largura de pulso (<i>Pulse Wide Modulation</i>).
VI	- Instrumento Virtual (<i>Virtual Instrument</i>) desenvolvido em ambiente LABVIEW.
USB	- <i>Universal Serial Bus</i> .
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina.
RSST	- Teste Rotacional de Chapa Única (<i>Rotational Single Sheet Tester</i>).
F.M.M.	- Força Magnetomotriz.
Laço BH	- Gráfico da indução magnética em função do campo magnético.

1. Introdução

1.1 Posicionamento do Problema e Motivação

A cada ano se torna mais evidente a preocupação da humanidade de preservar o meio ambiente. Uma das formas de alcançar esse objetivo sem comprometer o conforto e a comodidade que a tecnologia gera é aderir a produtos que tenham maior eficiência. Por outro lado, o que pesa muito nessa mudança de hábito é o custo que isso acarreta, já que, normalmente, para se desenvolver equipamentos mais eficientes é preciso investir em tecnologia.

Com a globalização e a abertura de mercados entre os países a busca de uma mercadoria com o preço mais baixo se intensificou, uma vez que surgiram novos mercados concorrentes. Além disso, surgiram também mais fornecedores de matérias-primas. Assim, para ser um concorrente competitivo no mercado é necessário adquirir a matéria-prima não apenas de um fornecedor, mas daquele que oferecesse um melhor custo-benefício.

A Embraco, maior produtora de compressores herméticos do mundo, utiliza como uma das principais matérias-primas o aço para fins elétricos. Os aços utilizados na fabricação dos compressores geralmente são utilizados laminados, pois quando construídos com núcleos laminados os compressores têm menor perda por corrente induzida. Cada tipo de lâmina possui certo grau de perda magnética e tem uma contribuição significativa nas perdas totais da máquina. Logo, pode-se perceber que para a escolha do aço utilizado não é suficiente levar em conta somente o preço, mas também, a sua eficiência.

Para testar um aço antes de comprá-lo utiliza-se um teste padronizado que é o teste de Epstein. Contudo, este teste, no caso dos motores elétricos, não demonstra exatamente as perdas que serão ocasionadas no produto acabado. Por exemplo, as perdas no ensaio de Epstein para uma amostra podem ser maiores do que para outra, e quando o motor é montado pode ocorrer o contrário. Isso pode ser explicado em parte, pois o teste de Epstein contempla apenas os campos eletromagnéticos alternantes, e não os campos existentes nos motores. Há também os efeitos das perdas interlaminares e da degradação da qualidade do aço no processo de estampagem.

Dessa forma, deseja-se desenvolver uma bancada capaz de ensaiar as chapas de aço na forma em que elas serão utilizadas. Além disso, esta bancada tem como finalidade

aprimorar o teste da qualidade dos estatores produzidos. Na produção dos estatores há vários tipos de defeitos que podem ocorrer. Alguns destes defeitos não são detectados facilmente na linha de produção e apenas se traduzem em um rendimento pior no produto acabado. Espera-se que esta bancada possa fornecer diretrizes para realizar um ensaio rápido, já que será feito na linha de produção, capaz de analisar os tipos de defeitos e avaliar se as perdas são relevantes ou não.

1.2 Objetivos e Métodos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e teste da parte magnética de uma bancada capaz de ensaiar estatores sob campos magnéticos da forma em que eles existem nos estatores.

Para contemplar os objetivos pretendidos foi feito um estudo do dispositivo magnético existente, utilizado para ensaiar estatores sob campos alternantes na linha de produção da Embraco. Em seguida, foram projetados e simulados vários protótipos, até que se chegou a um que atendesse os requisitos necessários. O protótipo foi confeccionado e então foram realizados alguns testes para verificar o seu funcionamento. Para a realização destes testes, foram utilizados os módulos de potência e controle da bancada para ensaios de materiais ferromagnéticos, que ensaia chapas únicas sob campos rotacionais, desenvolvida por SILVA [4].

2. Revisão Bibliográfica

Serão apresentados neste capítulo alguns assuntos que têm importância na realização deste trabalho, bem como estudos anteriores realizados que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Aço Elétrico

O aço para fins elétricos é um dos principais componentes dos motores elétricos, geradores e transformadores. Ele tem uma característica magnética muito importante, a de concentrar os campos magnéticos aplicados, já que possui uma permeabilidade muito superior à do ar [1].

Os equipamentos elétricos que possuem núcleos magnéticos apresentam perdas energéticas que diminuem seu rendimento. A qualidade do aço elétrico, ou seja, sua propensão a ocasionar a menor perda possível, está relacionada a algumas características de sua composição e fabricação [2]. Ao se aplicar um campo magnético variável no tempo em um aço elétrico, este gerará perdas associadas à histerese e às correntes induzidas [3]. A fim de atenuar as correntes induzidas no núcleo, o aço para fins elétricos é utilizado de forma laminada nas estruturas submetidas a campos variáveis no tempo.

Os aços para fins elétricos podem ser separados em duas grandes famílias segundo o sentido de orientação: os de grão orientado (GO) e os de grão não orientado (GNO) [4]. Os aços de grão orientado, que possuem permeabilidade pronunciada em uma direção, são normalmente utilizados em equipamentos onde há uma direção preferencial do fluxo, como em transformadores de potência. Por outro lado, onde é necessário ter as mesmas propriedades magnéticas em todas as direções, como em motores elétricos, usam-se os aços de grãos não orientados.

Para os compressores também são utilizados os aços de grãos não orientados e é altamente desejável que estes possuam uma elevada isotropia. Porém na prática não é isso o que acontece: os aços, mesmo sendo de grãos não orientados, apresentam certa anisotropia. Essa anisotropia produz quantidades de perdas diferentes para um mesmo campo aplicado em sentidos diferentes.

Visto que uma máquina elétrica tem como uma de suas principais parcelas de perdas em função das perdas magnéticas[5], é de fundamental importância a escolha do aço utilizado na sua produção. Para ilustração, a figura 2.1 apresenta lâminas do estator de um compressor feitas de aço elétrico de grãos não orientados.

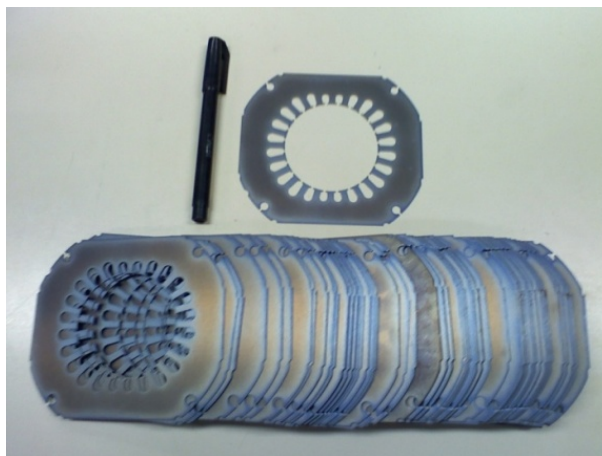


Figura 2.1 – Lâminas de aço elétrico de um estator de um compressor da Embraco.

2.2 Campos Rotacionais

Em certas máquinas rotativas e em algumas partes de transformadores trifásicos, onde a indução magnética varia com o sentido e a direção ao longo do tempo, existem campos rotacionais.

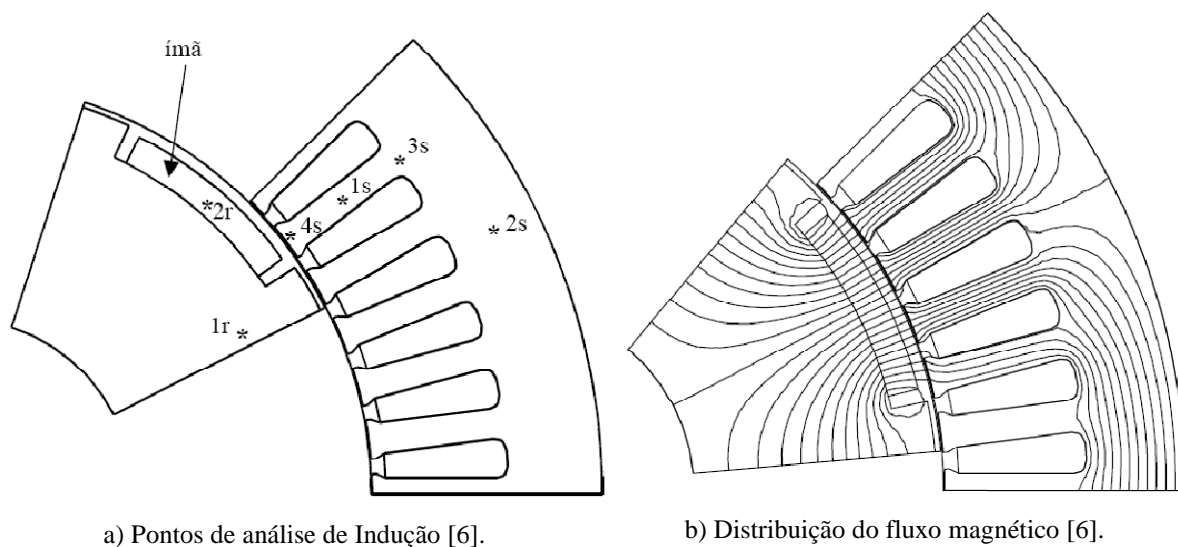


Figura 2.2 – Um pólo de um motor síncrono a ímãs permanentes.

Com o intuito de mostrar esse tipo de campo serão utilizados os resultados de um estudo feito em um motor elétrico com ímãs permanentes [6]. Foi simulado o motor da figura 2.2, sendo que em “a” são apresentados os pontos de análise da indução magnética, e em “b”, pode-se observar a distribuição do fluxo magnético.

Para a análise dos campos rotacionais foram utilizadas apenas as curvas de indução dos pontos do estator (1s, 2s, 3s e 4s). A seguir serão mostrados os resultados das componentes radiais e tangenciais da indução (B_r e B_t) em função da posição do rotor em graus (parte “a”), e o locus das induções B_t x B_r (parte “b”).

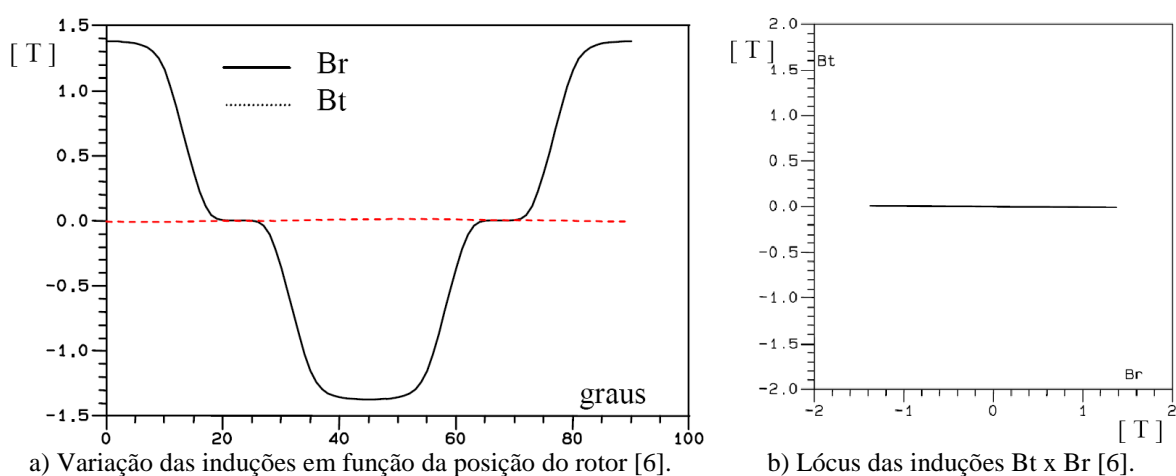


Figura 2.3 – Induções Magnéticas radiais e tangenciais no ponto 1 s.

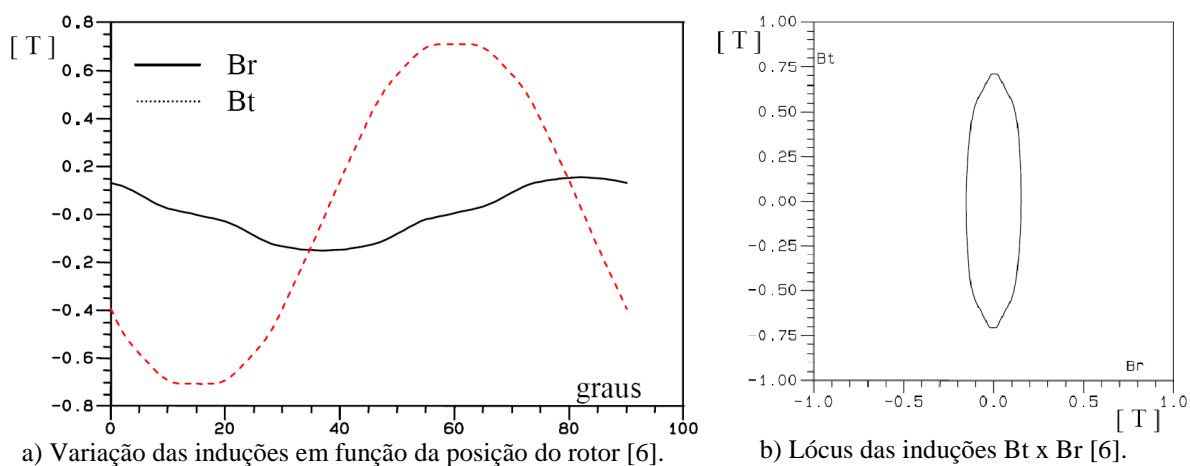


Figura 2.4 – Induções Magnéticas radiais e tangenciais no ponto 2 s.

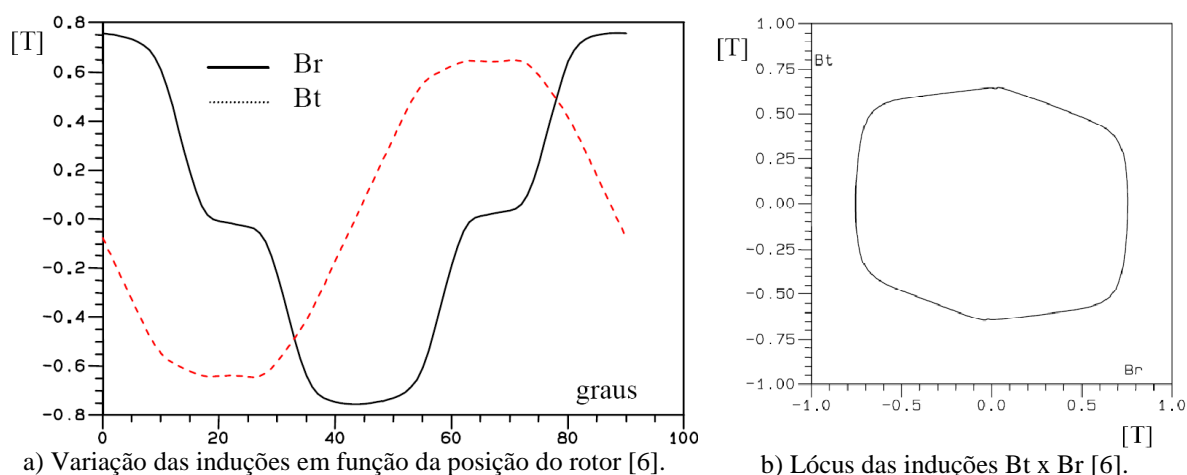


Figura 2.5 – Induções Magnéticas radiais e tangenciais no ponto 3 s.

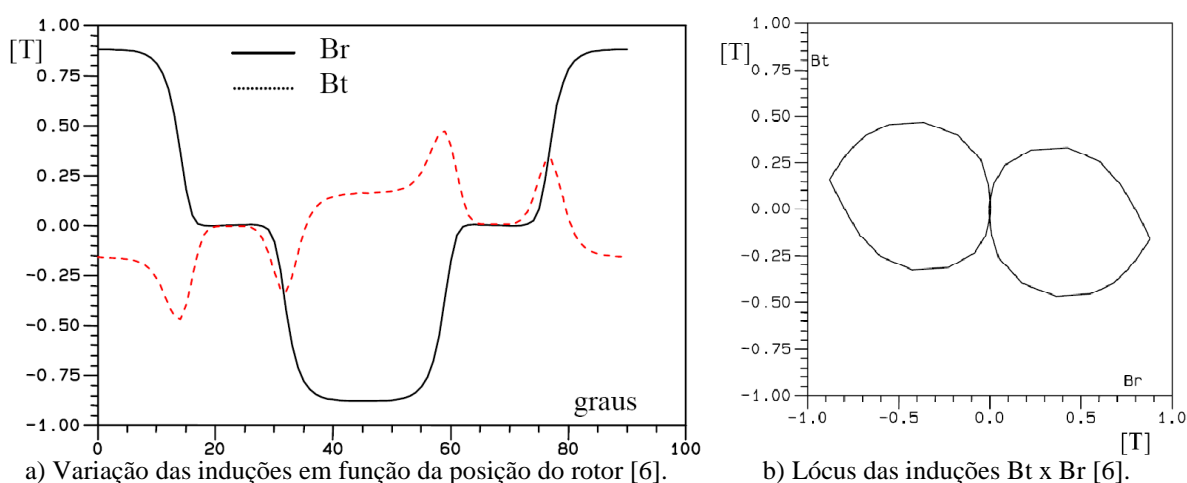


Figura 2.6 – Induções Magnéticas radiais e tangenciais no ponto 4 s.

As figuras apresentadas mostram que em certas regiões dos estatores há componentes de indução magnética que variam em amplitude e em direção, ou seja, rotativas. Assim, para esses casos é impossível analisar por completo as perdas energéticas a partir de ensaios realizados sob magnetização em uma só direção, como o de Epstein.

É de grande importância diferenciar as perdas acarretadas por campos alternantes das causadas por campos rotacionais. Essa relevância se deve ao fato de que o aço elétrico submetido a campos rotacionais ou elípticos possui um comportamento magnético diferente do aço submetido a um campo puramente alternante. Na figura 2.7 é possível observar a diferença de comportamento entre as perdas por histerese sob campos alternantes e sob campos rotacionais em função da indução magnética [2].

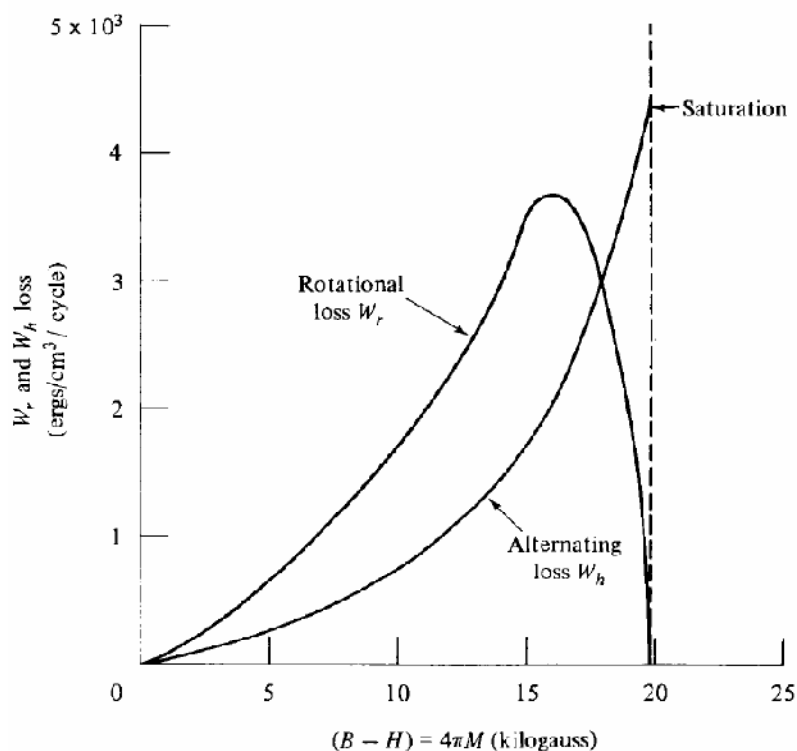


Figura 2.7 – Comportamento das perdas por histerese para campos alternantes e rotacionais em função de suas intensidades [2].

Sob campos alternantes as perdas crescem com o aumento do campo aplicado até a saturação. Para campos rotacionais as perdas crescem até um valor máximo e depois decrescem, sendo nulas na saturação. Pode-se observar, também, que para baixos valores de indução as perdas rotacionais são maiores que as perdas alternantes (aproximadamente o dobro). Porém, perto da saturação, as perdas sob campos rotacionais se tornam menores do que sob campos alternantes. Isso pode ser explicado, pois na saturação, quando sujeita a um campo rotacional, a amostra de material estaria saturada durante todo o processo de magnetização, não havendo mais deslocamento das paredes de domínio. Por outro lado, para magnetização puramente alternante, o material atinge a saturação para uma direção, desmagnetiza e satura novamente para outra direção em cada ciclo, aumentando cada vez mais as perdas com o aumento do nível de indução[2].

2.3 Fatores que Afetam as Propriedades Magnéticas

Existem alguns fatores que alteram as propriedades magnéticas dos aços e, conseqüentemente, as perdas energéticas dos compressores. Um estudo detalhado foi

realizado por MEURER [3], onde aponta alguns fatores que alteram as perdas magnéticas nos compressores. É de grande importância saber quais são os tipos de fenômenos que ocasionam perdas, já que um dos objetivos do projeto do qual esta dissertação faz parte é criar um equipamento capaz de detectar esses tipos de anomalias.

MEURER [3] cita que um dos fenômenos difíceis de serem estudados e detectados é o efeito dos caminhos alternativos de correntes induzidas no interior do estator. Isso é provocado por rebarbas, micro-soldas, parafusos de fixação, soldagem ou grampos no pacote do estator. Correntes induzidas circulando nestes caminhos alternativos criam um fluxo magnético contrário ao fluxo imposto. Isso faz com que ocorra uma maior dissipação de energia nestes locais do circuito magnético. Além disso, uma força magnetomotriz mais intensa é exigida, em relação a um estator considerado sadio. Portanto, além de o núcleo dissipar uma energia magnética maior, exigirá uma corrente elétrica superior, provocando perdas adicionais nos enrolamentos.

Neste estudo de [3] foi apresentado, também, que os anéis de curto-circuito fazem com que o laço BH se modifique principalmente na região onde a indução está se aproximando do seu valor máximo (ou mínimo) de operação. A figura 2.8 ilustra um laço BH (gráfico da indução magnética em função do campo magnético) de um ensaio realizado por MEURER [3] em um protótipo a 50 Hz e uma indução máxima de 1,1 Tesla. No projeto em que este trabalho está inserido, pretende-se detectar um padrão de modificação para esse fenômeno, pela análise dos laços BH em ensaios que submetam o estator a campos rotacionais.

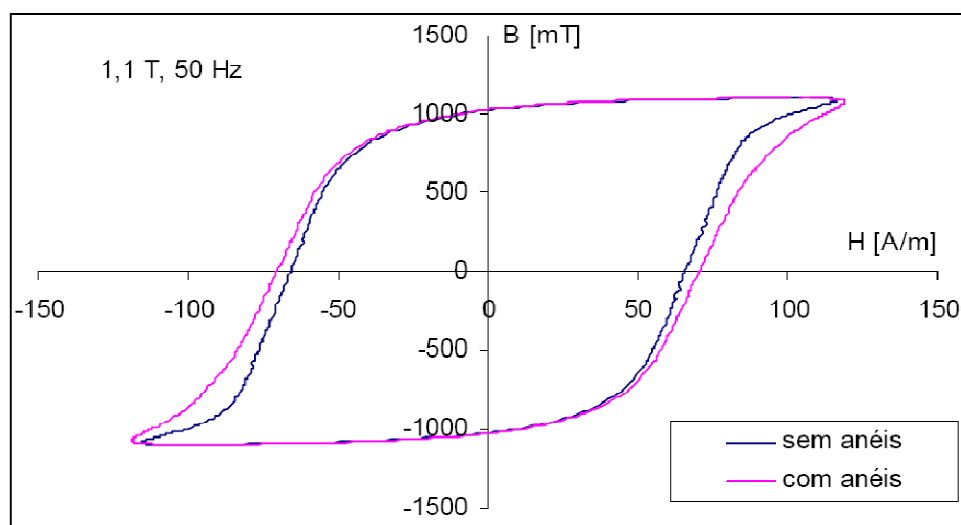


Figura 2.8 - Laço BH com e sem anéis de curto circuito, indução 1,1T [3].

Além disso, MEURER [3] apresenta outro problema que ocorre devido à estampagem dos estatores, que é o processo pelo qual as lâminas são recortadas no formato do circuito magnético do estator. Sabe-se que o tempo de vida útil da ferramenta que estampa os estatores afeta o desempenho final dos compressores, provavelmente devido à variação dimensional do entreferro e possivelmente à deterioração magnética da região dos dentes. Porém, para as medições e as análises realizadas por MEURER [3] em estatores montados com lâminas estampadas no início, meio e fim da vida útil da ferramenta de corte, não foi evidenciado um aumento sensível da perda magnética. Nos ensaios realizados naquele trabalho, o fluxo magnético foi imposto na coroa do estator, como se este fosse um toróide. A figura 2.9 mostra a simulação da distribuição do fluxo magnético no estator, sendo que a parte “a” representa as linhas de fluxo em um estator com alimentação no enrolamento principal e a parte “b” um estator com alimentação igual ao do ensaio realizado por MEURER [3]. Espera-se que com um sistema que force a passagem do fluxo pelos dentes possa se detectar defeitos de estampagem.

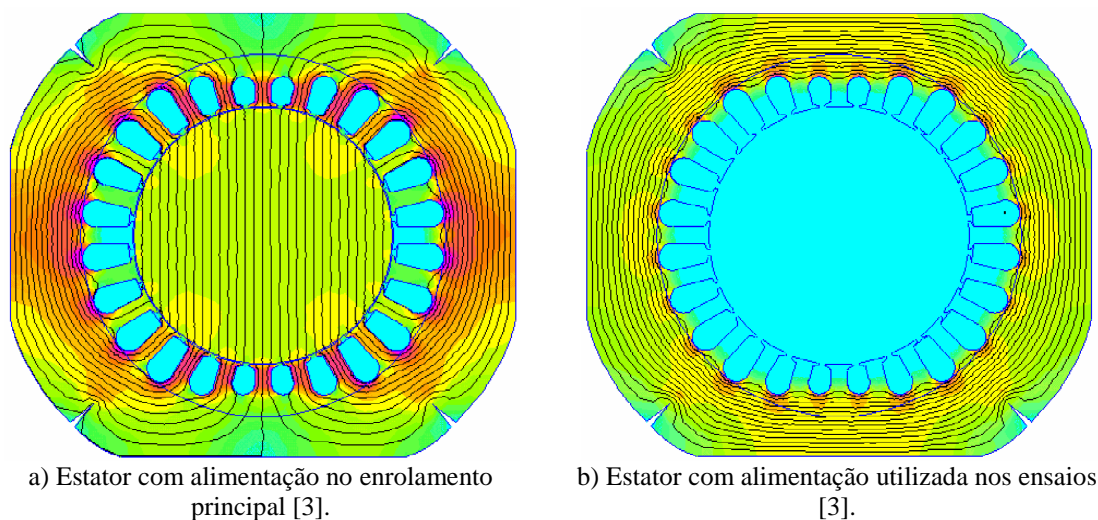


Figura 2.9 – Distribuição do fluxo magnético no estator.

2.4 Bancada para Campos Rotacionais

Para o ensaio de caracterização do material é necessário que seja controlada a forma de onda da indução aplicada. Isso se deve ao fato que existe alteração nas perdas magnéticas para um mesmo valor máximo de indução, porém com diferente conteúdo

harmônico [7]. Para a determinação das perdas geralmente usa-se uma indução na forma senoidal, embora possam ser utilizados outros tipos de regime.

Com o objetivo de controlar a indução foi utilizada neste trabalho a bancada para ensaios sob campos rotacionais desenvolvida por SILVA [4] em sua tese. Esta bancada foi confeccionada, por sua vez, tendo como base a bancada elaborada por BATISTELA [7], durante sua tese. BATISTELA [7], tendo como dispositivo de ensaio o quadro de Epstein, que utiliza campos alternantes, implementou um inversor de tensão com malha de controle por modo deslizante, obtendo bons resultados.

Visto que a bancada de SILVA [4] ensaia chapas únicas, foi necessário alterar sua parte magnética. Modificaram-se, também, as formas de aquisição e os programas de tratamento dos dados. A bancada utilizada, bem como as modificações feitas, serão explicadas no capítulo 3.

3. Bancada de Testes Rotacionais

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição das partes integrantes da bancada de testes rotacionais utilizada para ensaiar o testador de núcleo utilizado pela Embraco e o novo dispositivo eletromagnético projetado. Também serão mostradas as modificações realizadas na bancada para ensaiar os novos dispositivos magnéticos. Esta bancada, desenvolvida por SILVA [4] foi projetada e construída com o objetivo de analisar chapas únicas submetidas a campos rotacionais.

3.1 Considerações Iniciais

O sistema de caracterização de aços para fins elétricos sob campos rotacionais desenvolvido por SILVA [4] é do tipo RSST (teste rotacional de chapa única), sendo o quadro magnético alimentado por um conjunto de inversores de frequência com malhas de controle realimentadas. Esta bancada permite a análise de perdas rotacionais em lâminas quadradas de material ferromagnético. A alimentação do quadro é feita por duas fontes sincronizadas com as formas de onda das respectivas saídas. Para tal, a bancada impõe formas de onda de tensão independentes para cada eixo de magnetização do quadro magnético, tanto em forma quanto em amplitude e frequência.

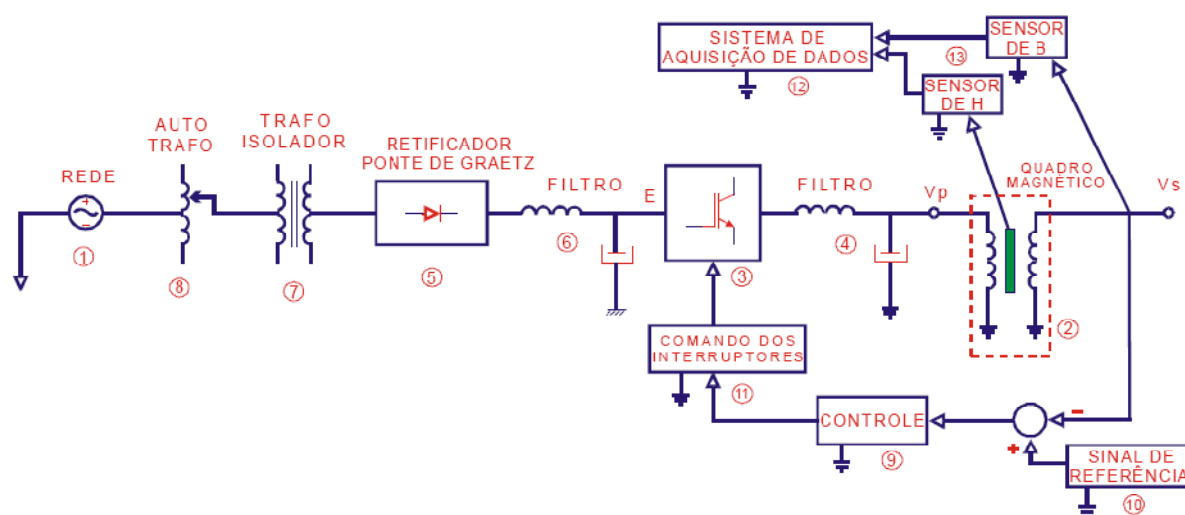


Figura 3.1 – Diagrama de blocos da bancada construída por SILVA [4].

A figura 3.1 mostra o diagrama de blocos de uma das fontes do sistema, alimentando um eixo do quadro magnético. Cada fonte é constituída por treze blocos funcionais, conforme o diagrama apresentado. O funcionamento descrito pelo diagrama é o seguinte [4]:

A energia é captada da rede elétrica comercial (bloco 1), sendo a alimentação trifásica. A entrada da alimentação é protegida por um disjuntor trifásico termo-magnético. Em seguida, existe um autotransformador regulável (bloco 8), que ajusta a tensão de alimentação do quadro magnético. A saída do autotransformador (bloco 8) é ligada a um isolador galvânico (bloco 7), sendo um transformador trifásico.

Com isso, a energia da rede já está adequada para alimentar a fonte de tensão contínua da bancada. Ela é composta por uma ponte retificadora trifásica do tipo Graetz (bloco 5) e por um filtro constituído por um banco de capacitores e por um indutor (bloco 6). A saída do filtro passa pelo inversor de tensão (bloco 3) em ponte completa, sendo empregados como interruptores IGBTs. Os interruptores comutam em uma frequência fixa em modulação do tipo PWM (Pulse Width Modulation).

O inversor de tensão possui um filtro de saída (bloco 4), que é composto por uma indutância e por uma capacitância. Este indutor foi escolhido de modo a não ser um limitante da evolução da corrente do circuito. Desta forma, há uma transferência adequada de potência da fonte para o quadro magnético.

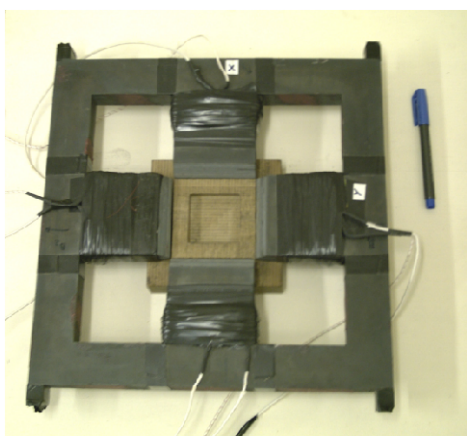
O quadro magnético (bloco 2) é composto pela sobreposição de lâminas de aço-silício [5]. A excitação é obtida por intermédio de dois conjuntos de bobinas, cujos eixos magnéticos são ortogonais, aqui convencionados como sendo segundo as direções “x” e “y”. Estas bobinas são alimentadas por duas fontes independentes.

Os sinais de referência (bloco 10) para as malhas de controle inversoras são gerados por uma placa da National Instruments instalada em um computador pessoal, através de um instrumento virtual criado em ambiente LabView. O sinal de referência gerado é comparado com o sinal de saída nos sensores de indução (bloco 13), gerando o sinal que serve como controle do inversor (bloco 11). A malha de controle (bloco 9) implementada faz com que a forma de onda da indução na lâmina de teste seja igual à da referência. Os sinais de comando dos interruptores do inversor (bloco 11), que são provenientes da placa de controle (bloco 9), são condicionados por placas que isolam o inversor e o controle, e possuem sistema de proteção de sobretensão e sobrecorrente nos interruptores.

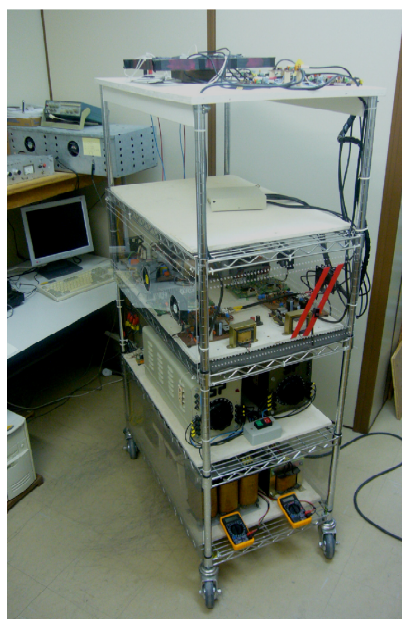
Os sensores (bloco 13) de indução e campo magnético foram desenvolvidos para captar imagens das formas de onda da indução e do campo magnético aplicadas sobre a amostra. A tensão induzida nos sensores de indução realimenta a malha de controle dos inversores.

O sistema de aquisição e tratamento de dados da bancada (bloco 12) usa os sinais de tensão adquiridos pelos sensores para obter valores instantâneos de indução e campo magnético, calcular as perdas envolvidas por ciclo elétrico e apresentar os resultados graficamente, de maneira rápida, clara e precisa. O sistema está baseado na aplicação de programas numéricos utilizando VI's (*Virtual Instruments* – Instrumentos Virtuais), desenvolvidos no ambiente Labview.

Pode-se ver, em detalhe, o quadro magnético e a bancada na Figura 3.2. Na parte “a” mostra o quadro magnético no meio do qual é posicionada a amostra para ensaio. A parte “b” mostra a disposição dos equipamentos da bancada, sendo da seguinte maneira (de baixo para cima): na primeira prateleira estão as duas fontes de corrente contínua e os transformadores isoladores; na segunda, os dois autotransformadores; e na terceira os circuitos inversores com suas respectivas placas de controle e comando. Na parte superior encontram-se o quadro magnético e os amplificadores dos sinais de indução e campo magnético.



a) Quadro Magnético [4].



b) Bancada para teste rotacional em chapas únicas [4].

Figura 3.2 – Detalhe do quadro magnético e da bancada.

3.2 Alteração da Parte Magnética da Bancada

A parte magnética da bancada desenvolvida por ESPÍNDOLA [5] foi projetada para testar chapas únicas sob campos rotacionais. A amostra deve ter uma medida específica.

Para ensaiar estatores é necessário desenvolver e adaptar na bancada um dispositivo magnético diferente do quadro utilizado por SILVA [4], uma vez que o quadro magnético aplica campos rotacionais em amostras quadradas. Logo, o novo dispositivo magnético deve ensaiar o aço sob a forma de estatores e aplicar campos como em um funcionamento normal do estator.

Foi utilizado como parte magnética para ensaiar estatores na bancada de SILVA [4] primeiramente o testador de núcleos, que é um dispositivo magnético utilizado na Embraco a fim de ensaiar estatores sob campos alternantes em sua linha de produção (Capítulo 4). Para tal, foi necessário utilizar apenas a excitação e o controle de um dos eixos da bancada, já que os eixos tanto de excitação como de controle atuam de maneira independente.

Outro dispositivo utilizado no lugar do quadro magnético para ensaiar estatores sob campos rotacionais foi o desenvolvido nesta dissertação. Para a excitação e o comando utilizaram-se os dois eixos da bancada. A figura 3.3 apresenta os dispositivos magnéticos utilizados na bancada de ensaios no lugar do quadro magnético.



Figura 3.3 – Dispositivos magnéticos utilizados:
à esquerda: dispositivo desenvolvido neste trabalho; à direita: testador de núcleo.

3.3 Substituição dos Sensores de Campo e Indução

Nos testes tradicionais de Epstein a indução magnética é obtida através da tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein, enquanto o campo magnético é determinado através da corrente elétrica do enrolamento primário [7]. Isso pode ser feito, pois o fluxo magnético atravessa somente a amostra que se deseja caracterizar. Para a bancada de SILVA [4] esse tipo de medida não foi possível, já que o fluxo era gerado no quadro magnético e apenas parte deste fluxo atravessa a amostra em teste.

Logo, para obter a imagem da indução magnética, SILVA [4] utilizou sensores de indução, que são bobinas que envolvem a amostra. Os sensores funcionam pelo princípio de que uma variação do fluxo magnético no tempo induz uma tensão nos terminais da bobina proporcional a indução que o criou [1]. E para se obter o campo magnético, SILVA [4] utilizou a propriedade da conservação da componente tangencial do campo magnético na passagem de um material ferromagnético para o ar, ou seja, o campo magnético acima da amostra é considerado como sendo o campo dentro da amostra [1]. Para tal ele utilizou um sensor que consiste em algumas espiras enroladas em um núcleo de material não magnético e colocado paralelamente à lâmina sob ensaio.

Para se obter a indução e o campo magnético nos testes dos estatores será empregado o mesmo método utilizado no teste de Epstein, ou seja, a imagem da indução magnética será a tensão induzida em um enrolamento secundário e a imagem do campo magnético será a corrente do enrolamento primário do dispositivo desenvolvido.

Para o novo teste sob campo girante o fluxo magnético passará não somente pela amostra que se deseja caracterizar, mas também pelo material ferromagnético do próprio dispositivo de teste. Dessa forma, os valores das grandezas eletromagnéticas medidas não corresponderão exatamente aos valores na amostra. No entanto, o enfoque deste trabalho não é quantificar o total de perdas em um estator em teste, mas sim compará-las qualitativamente às obtidas para um estator comprovadamente em bom estado.

3.4 Alteração do Programa de Aquisição e Tratamento de Dados

Na bancada desenvolvida por SILVA [4] os programas de aquisição e tratamento de dados adquirem os sinais de tensão dos sensores de indução e campo magnético. Com o tratamento dessas formas de onda eram obtidos os sinais de indução e campo magnético e

calculavam-se as perdas, os respectivos laços de indução magnética em função do campo magnético (laço BH), laços de indução no eixo “x” por indução no eixo “y” e campo no eixo “x” por campo no eixo “y”.

Nos testes dos estatores não foram utilizados os mesmos sensores utilizados por SILVA [4], como foi explicado na seção anterior. Além disso, foi necessário adquirir a forma de onda da corrente do primário que alimenta o dispositivo utilizado, o que não é possível de se fazer através da placa de aquisição utilizada por SILVA [4], visto que esta adquire ondas na forma de tensão.

Logo, para a aquisição das formas de onda da tensão do enrolamento secundário e da corrente do enrolamento primário foi utilizado um osciloscópio digital do tipo DPO4104 do fabricante Tektronix. Este osciloscópio possui quatro canais, atendendo o teste de estatores sob campos rotacionais onde é necessário adquirir duas formas de onda de corrente e duas de tensão. Após a aquisição do sinal por osciloscópio, o sinal é enviado para um computador por cabo USB (*universal serial bus*) através de um instrumento virtual desenvolvido em LabView [8].

O instrumento virtual desenvolvido, além de fazer a aquisição do sinal do osciloscópio, faz o tratamento dos dados. O cálculo do campo e da indução magnética nos estatores não foi realizado, pois para tal seria preciso calcular a secção magnética efetiva (indução magnética) e o caminho médio magnético (campo magnético) do estator ensaiado, que são variáveis de difícil obtenção. Logo, o programa utiliza apenas as formas de onda da corrente do primário e da integral da tensão do secundário, o que resulta em valores proporcionais à indução e ao campo magnético, respectivamente, já que esses são calculados em função apenas de constantes. Com isso, o valor total das perdas também não foi calculado, mas sim um valor que é proporcional às perdas e que é útil para fins de comparação será útil.

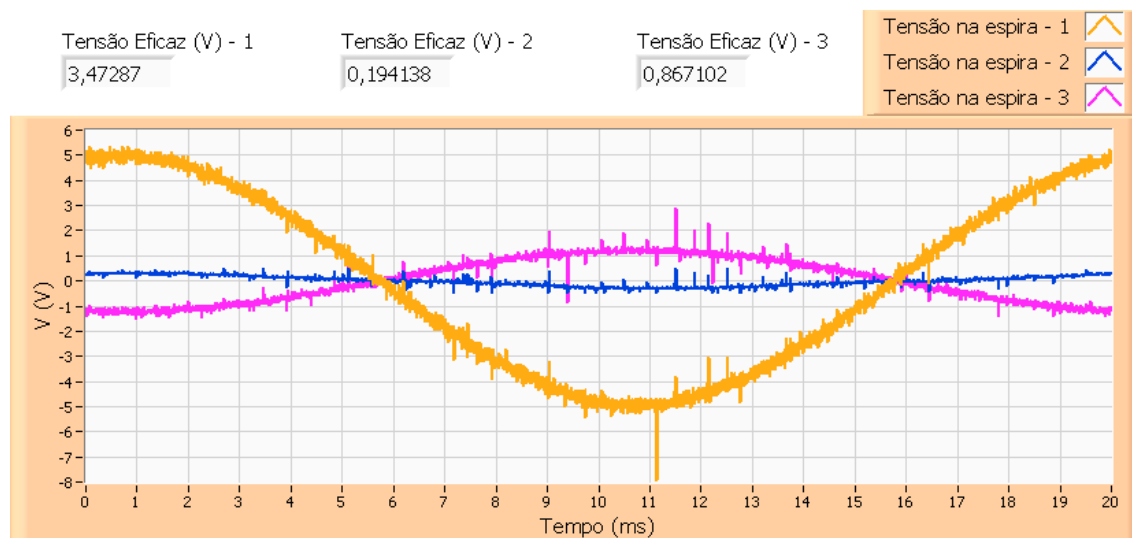
Logo, o programa fornece as formas de onda da tensão e da corrente adquiridas, o laço da integral da tensão em função da corrente para cada eixo de magnetização (proporcional ao laço BH), a área de cada laço (proporcional às perdas), o laço da integral da tensão de um eixo pela integral da tensão do outro eixo, laço da corrente de um eixo pela corrente do outro eixo, e uma curva, para cada eixo de magnetização, nos moldes do teste realizado para campos alternados na Embraco (Capítulo 4), que traça a corrente eficaz em função da tensão eficaz para vários pontos de operação, até atingir a saturação da

amostra. Todos os dados são salvos em arquivo em formato texto e são lidos por outro programa, também em LabView.

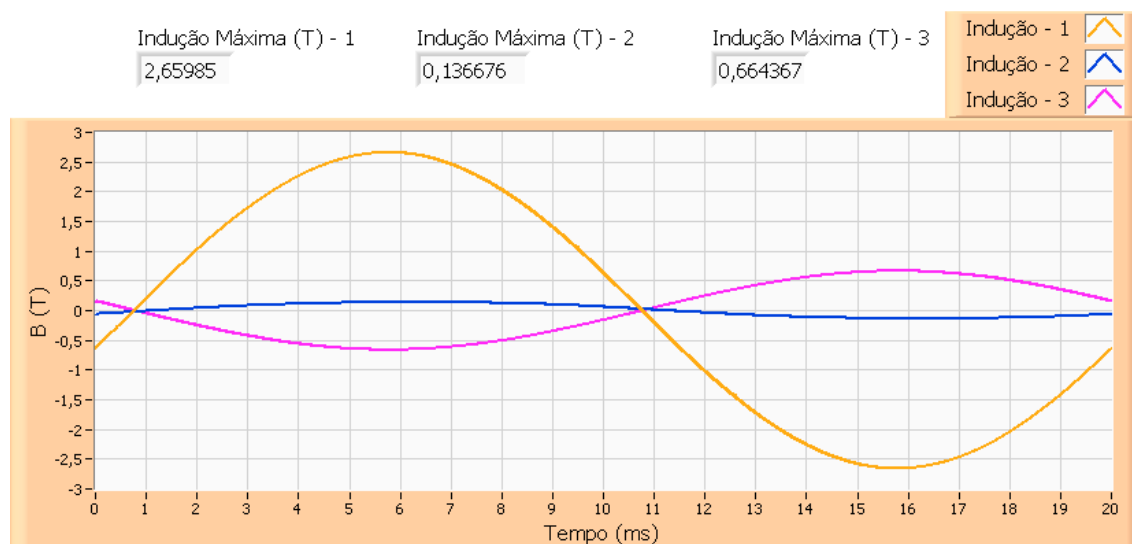
É importante ressaltar que todos os sinais adquiridos foram tratados no osciloscópio, através da função “alta resolução”, a qual filtra as componentes de alta frequência (do sinal de tensão), decorrentes do chaveamento da bancada. Para verificar que esta função não alterara as formas de onda das induções adquiridas foram feitos alguns testes, descritos a seguir.

Foram adquiridos três sinais de amplitudes diferentes de duas formas: com tratamento e sem tratamento. Em seguida, foram feitos os cálculos da forma de onda e do valor de pico da indução, bem como o valor eficaz da tensão. A seguir serão apresentados os resultados, sendo que a figura 3.4 representa os sinais com ruído e a figura 3.5, os sinais tratados.

Nestas figuras pode-se observar que a forma de onda da tensão apresenta certa diferença quando se compara os sinais com e sem filtro. Apesar disso, a forma de onda da indução, que é proporcional à integral da tensão, permanece praticamente inalterada. Nota-se, também, que a ordem de grandeza do ruído é sempre a mesma, não variando conforme a amplitude do valor da tensão. Além disso, a magnitude dos sinais de tensão adquiridos usualmente é maior do que a dos sinais adquiridos neste teste. Como a visualização dos sinais com tratamento é mais clara, optou-se, nesta dissertação, por se apresentar sempre os sinais já tratados.

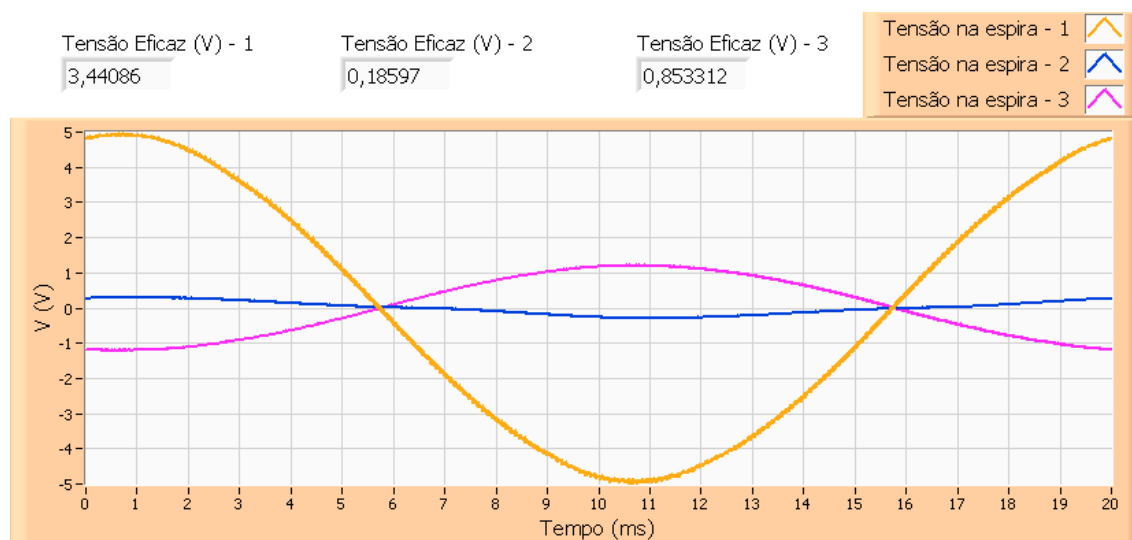


a) Tensões nos sensores.

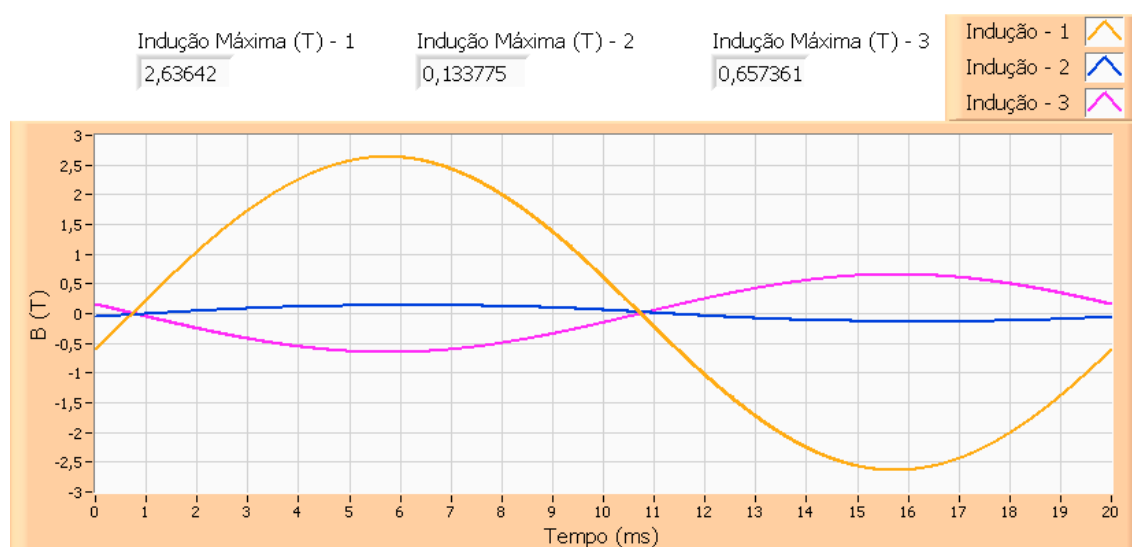


b) Indução.

Figura 3.4 – Sinais sem filtro.



a) Tensões nos sensores.



b) Indução.

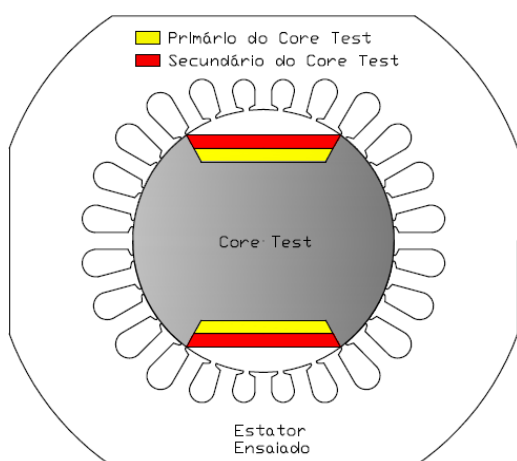
Figura 3.5 – Sinais com filtro.

4. Testador de Núcleo

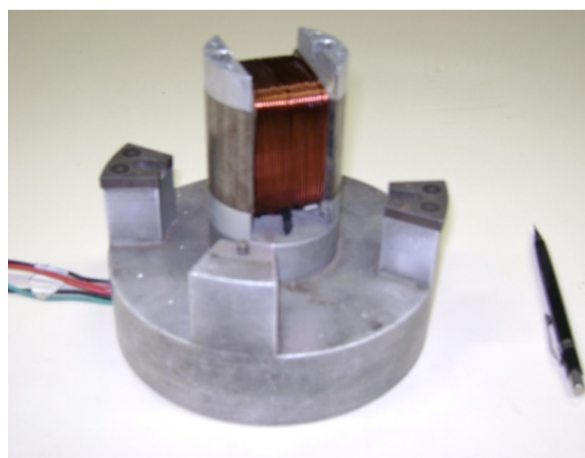
Neste capítulo será apresentado o dispositivo eletromagnético utilizado atualmente na Embraco para ensaiar estatores na linha de fabricação, bem como suas principais características, especificações técnicas, simulações e testes.

4.1 Considerações Iniciais

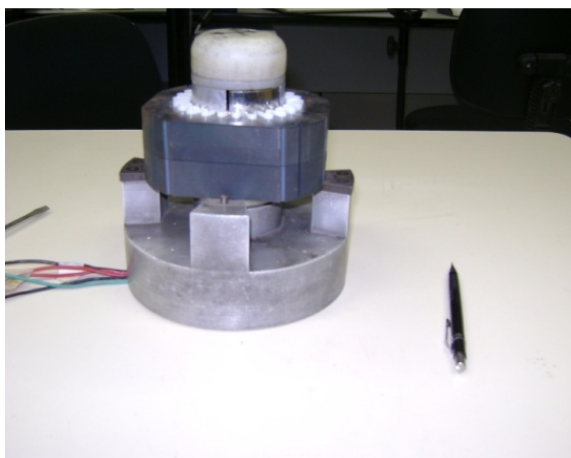
Normalmente em projetos de novos produtos tomam-se como base os dispositivos já existentes. Logo, para o projeto de um novo dispositivo magnético para ensaiar estatores sob campos rotacionais, não foi diferente.



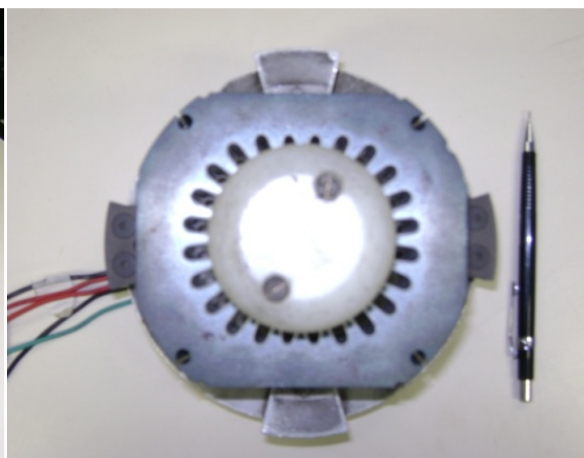
a) Esquemático do testador de núcleo mostrando seus enrolamentos.



b) Foto do testador de núcleo com detalhe da bobina.



c) testador de núcleo com o estator.



d) Visão de cima do testador de núcleo com o estator.

Figura 4.1 – Testador de núcleo e o estator.

Foi realizado um estudo sobre um dispositivo já comumente utilizado, porém que faz ensaios em estatores sob campos em uma única direção. O testador de núcleo é um dispositivo magnético utilizado na Embraco para o ensaio das laminas do estator com a finalidade de encontrar algum possível defeito que estes tenham sofrido em sua linha de produção. Atualmente o ensaio realizado acusa apenas os defeitos e não indica a causa, e não funciona para o estator como um todo, já que é realizado magnetizando o estator apenas em uma direção e contempla relativamente mais a coroa.

Este equipamento é constituído por duas bobinas: uma primária e uma secundária. As bobinas envolvem o núcleo feito de aço silício de grão orientado. Seu formato é um círculo com duas cordas paralelas em lados opostos, figura 4.1. O núcleo do testador de núcleo é construído de forma que o circuito magnético seja fechado pelas lâminas do estator que nele são ancoradas.

4.2 Ensaio dos Estatores

O ensaio no testador de núcleo é baseado na abordagem experimental típica dos ensaios de Epstein, segundo os quais se aplica um valor de tensão no enrolamento primário, e mede-se a corrente neste mesmo enrolamento e a tensão no enrolamento secundário. O campo e a indução magnética são obtidos através da corrente elétrica do enrolamento primário e da tensão elétrica do enrolamento secundário, respectivamente.

É importante ressaltar que a parte “a” da figura 4.1 ilustra o posicionamento correto do estator em relação ao testador de núcleo. Para a repetibilidade do ensaio é necessário que o estator esteja sempre em uma posição fixa em relação ao testador de núcleo, já que o estator não tem simetria radial.

Na Embraco este teste é realizado variando-se o valor eficaz da tensão alternada no primário de 0 até 220 Volts, mantendo-se a frequência em 60 Hz. Obtêm-se assim uma curva de tensão eficaz do secundário versus corrente eficaz do primário. Tendo como padrão uma curva de referência típica, os estatores são avaliados por comparação, Figura 4.2.

O critério de seleção dos estatores para a curva típica é o seguinte:

- Escolhem-se os estatores que já são conhecidos como “sadios”.
- Faz-se o ensaio do testador de núcleo e armazenam-se os valores das curvas.
- Para uma mesma corrente são calculados dois limiares.

- Realizam-se então os ensaios seguindo o critério de amostragem, segundo o qual os lotes que não estão nessa faixa de tolerância são analisados e/ou descartados.

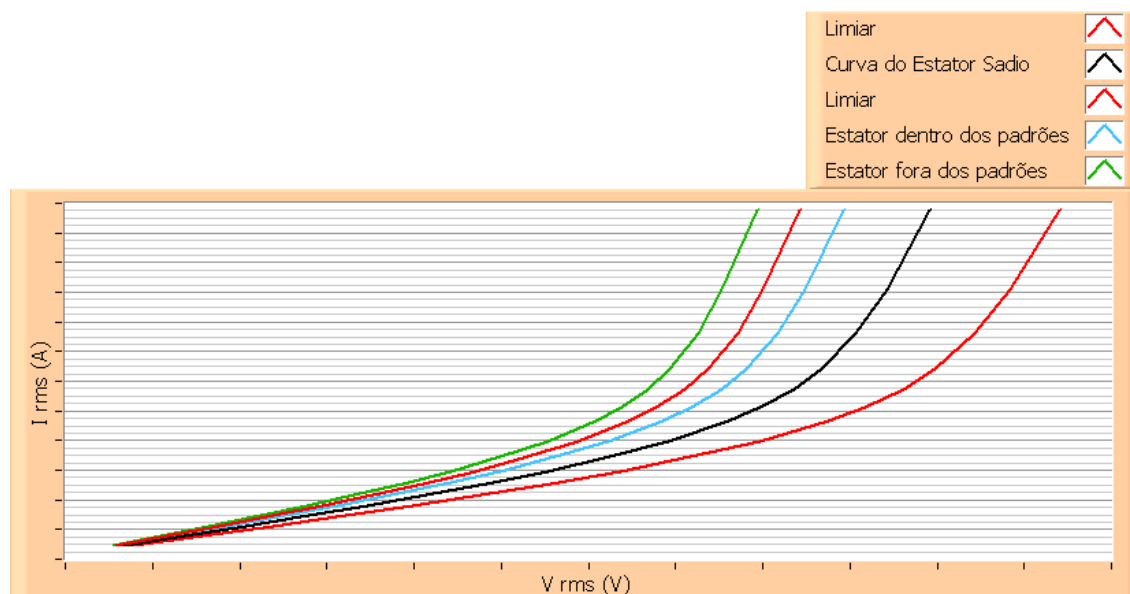


Figura 4.2 – Exemplo de testes realizados nos estatores.

4.3 Simulação do Testador de núcleo

Foi feita uma simulação do funcionamento do testador de núcleo, para ver os níveis de indução atingidos no estator, como se distribuía o fluxo no estator e o efeito da variação do entreferro nos ensaios. As simulações foram realizadas através do software EFCAD [10], desenvolvido no Grucad e é uma ferramenta consolidada que realiza os cálculos por elementos finitos.

Para a simulação foi considerado apenas o caso extremo de funcionamento, ou seja, para simular foi utilizada uma corrente contínua no valor da corrente máxima da senóide aplicada, visto que para uma simulação com variação temporal o tempo de cálculo seria muito maior e não alteraria as conclusões que podem ser extraídas dos resultados. Na simulação não foi necessária a utilização do domínio de cálculo representando o equipamento todo, já que geometricamente e magneticamente este apresenta simetria, portanto, foram simuladas apenas a metade do testador de núcleo e a metade do estator.

Para as simulações utilizou-se para as lâminas do estator o aço E230; sua curva de magnetização (indução por campo magnético) está apresentada no anexo 8.1. As dimensões do estator utilizadas nas simulações encontram-se no anexo 8.2. Para o núcleo

do testador de núcleo foi considerado um material linear, ou seja, não saturável, uma suposição plausível, já que o núcleo é feito de um aço elétrico de grãos orientados, o qual possui um ponto de saturação bem mais alto que para grãos não orientados, dos estatores.

4.3.1 Carta de indução do Testador de núcleo

A figura 4.3 apresenta a carta de indução magnética (densidade de fluxo magnético) nas lâminas do estator e do testador de núcleo em Tesla. Foi simulado o funcionamento do testador de núcleo para um entreferro de 0,05 milímetros.

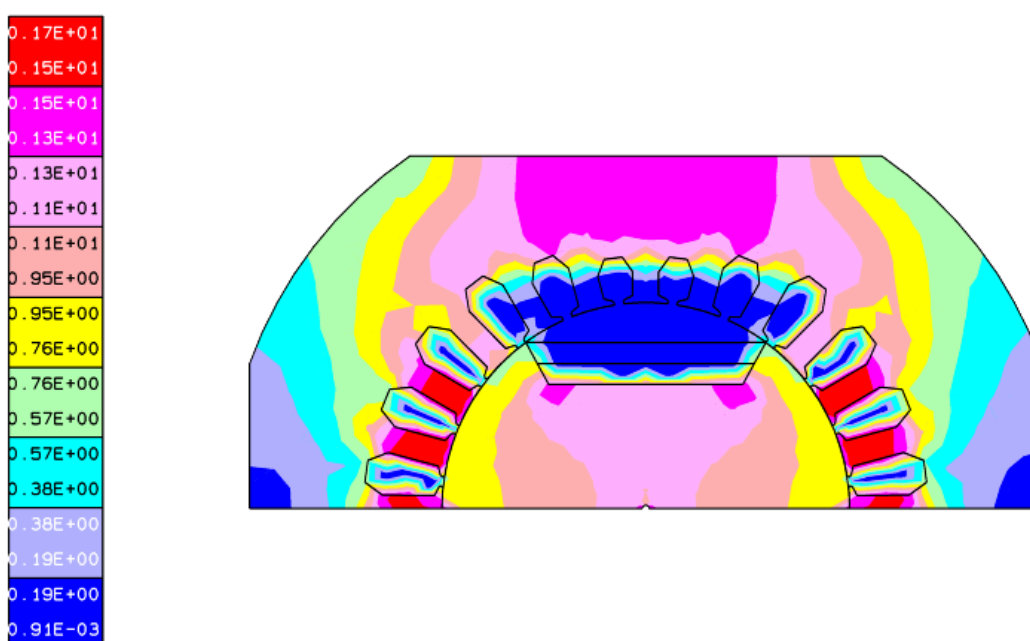


Figura 4.3 - Carta de Indução do testador de núcleo e do estator em Tesla.

Pode-se perceber que a indução em quatro dentes atingiu a saturação. Outro fator importante foi a constatação de que o núcleo deste testador de núcleo não saturou, o que era esperado, pelo fato de o aço ser de grão orientado. Isso demonstra a viabilidade técnica do sistema de ensaio, pois se o núcleo saturasse, muita energia seria utilizada para a magnetização do núcleo. Isso prejudicaria o desempenho do sistema, já que as perdas do núcleo se tornariam relativamente grandes em relação às perdas nos estatores. Assim, para o desenvolvimento do novo dispositivo de ensaio, a não saturação do núcleo foi um dos critérios adotados.

4.3.2 Linhas de fluxo magnético do testador de núcleo

A figura 4.4 apresenta as linhas de fluxo para o testador de núcleo. Nesta figura pode-se perceber que o fluxo não percorre todos os dentes do estator, o que faz com que não seja possível detectar possíveis defeitos na região dos dentes. Esta análise pelo cálculo por elementos finitos demonstra as restrições quando se impõe fluxo no estator em apenas uma direção. Dessa forma, outro critério que foi adotado para o desenvolvimento do novo dispositivo de testes rotacionais foi que ele submetesse todos os dentes do estator a um campo magnético, ou seja, as linhas de fluxo deveriam passar por todos os dentes do estator.

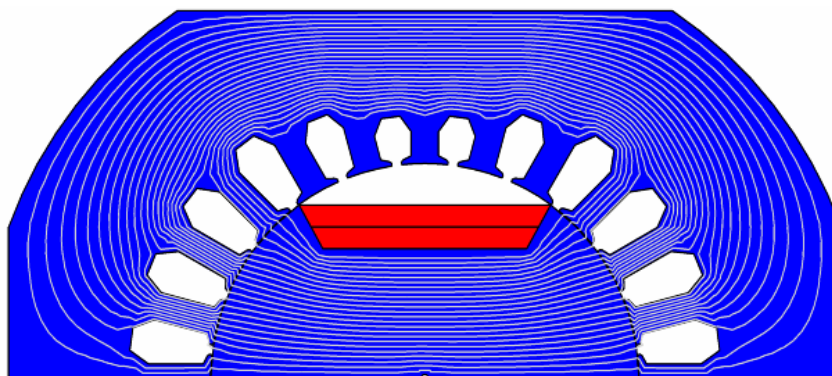


Figura 4.4 - Linhas de fluxo do testador de núcleo e do estator.

4.3.3 Variação do entreferro

Nesta simulação tentou-se estudar os efeitos que ocorrem pela variação do entreferro. Essa diferença de entreferro ocorre, pois há um nível de tolerância aceitável no processo de usinagem das lâminas do estator.

Escolhendo-se um valor médio de entreferro 0,05 mm, foram simulados os casos de uma variação de 0,05 mm para mais e para menos, ou seja, para um entreferro de 0,1 mm e para um modelo sem entreferro, apesar de que isto seja impossível de ocorrer.

As figuras 4.5 e 4.6 apresentam as cartas de indução, em Tesla, resultantes da simulação aplicando uma densidade de correntes de 3 A/mm^2 . Na figura 4.5 o entreferro é de 0,1 mm e na figura 4.6 este é nulo.

Nas cartas pode-se perceber que para uma mesma corrente se tem diferentes níveis de indução na coroa e nos dentes do estator. O fator de variação do entreferro deverá

ser levado em conta no projeto de um novo dispositivo. Logo, será necessário simular o projeto de um novo dispositivo para verificar se este atende aos requisitos necessários.

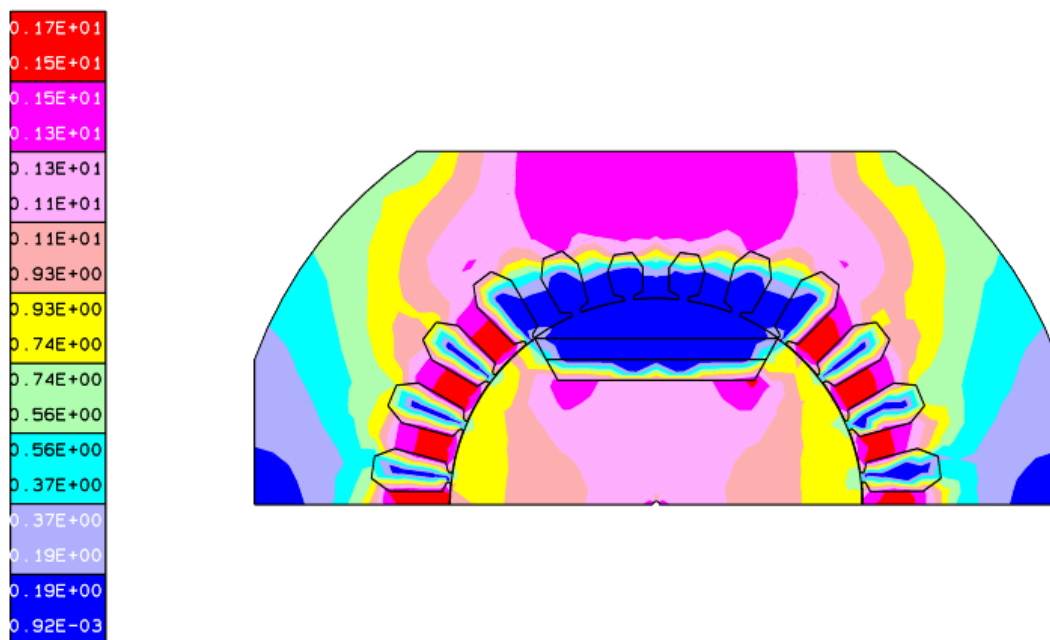


Figura 4.5 - Carta de indução com entreferro de 0,1 milímetros, valores em Tesla.

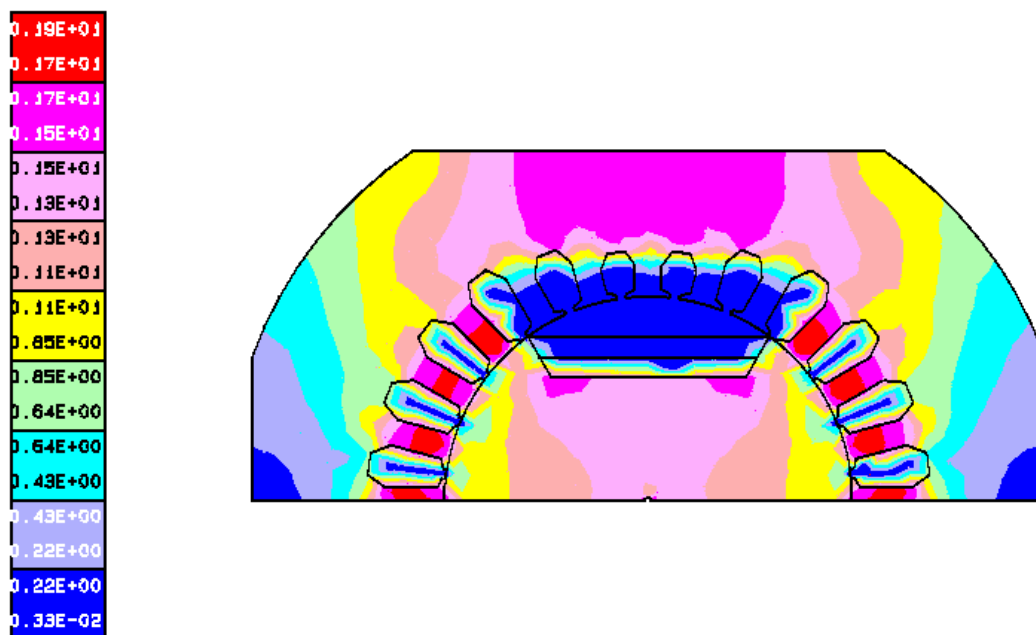


Figura 4.6 - Carta de indução sem entreferro, valores em Tesla.

Assim, para as simulações do projeto do novo dispositivo magnético, escolheu-se um entreferro com um valor intermediário, de 0,05 mm, para realizar as simulações dos projetos do novo dispositivo. Caso este atenda aos requisitos necessários, proceder-se-á à variação do entreferro para verificação

4.4 Ensaios Realizados no Grucad

Para os ensaios preliminares foi aproveitado um testador de núcleo que havia sido fornecido pela Embraco para um estudo anterior. Neste caso a análise obtida não é fiel ao que ocorre nas medidas realizadas na empresa, pois o testador de núcleo que estava disponível já havia sido modificado. No caso, as modificações ocorreram apenas no número de espiras do primário e do secundário. A bobina primária ficou constituída de 62 espiras, e a secundária com 70 espiras.

Para testar o dispositivo foi utilizada a bancada desenvolvida por SILVA [4] com as modificações apresentadas anteriormente. Por ser um dispositivo que aplica campos alternantes foi necessária a utilização de apenas um dos eixos de magnetização.

Estes testes foram divididos em três etapas: um ensaio de elevação de tensão, um ensaio do valor de indução magnética na coroa do estator e um ensaio da averiguação da indução magnética nos dentes do estator. Para os ensaios nos quais é feita a averiguação da indução magnética foi necessário utilizar sensores de indução, o que será explicado na próxima seção.

Para todos os testes realizados nesta dissertação foram utilizadas lâminas de estator do mesmo lote, ou seja, com as mesmas características magnéticas; as dimensões destas lâminas se encontram no Anexo 8.2. Além disso, foram feitas lâminas para ensaio de Epstein com o mesmo lote de aço elétrico utilizado; o resultado deste teste se apresenta no Anexo 8.3.

4.4.1 Sensores de indução

Antes de apresentar os ensaios realizados será necessário explanar uma das técnicas utilizadas para a medição da indução em certas regiões. Este tipo de ensaio é fundamentado pela “lei de Faraday”, segundo a qual uma variação de fluxo cria uma força eletromotriz na espira envolvendo a secção através da qual este fluxo variou [1].

Para um melhor entendimento será apresentado um exemplo do funcionamento deste tipo de sensor. Seja um núcleo de material magnético de secção transversal S envolvido por um enrolamento de N espiras como mostrado na figura 4.7. Se este núcleo for submetido a uma indução magnética variável no tempo esta pode ser determinada a partir da tensão que aparece nos terminais dado pela expressão 4.1

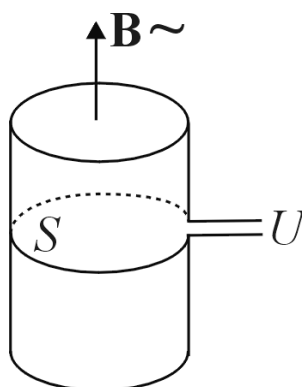


Figura 4.7 – Indução magnética variável no tempo em um núcleo magnético [1].

$$B(t) = \frac{1}{N \cdot S} \int U(t) \cdot dt \quad [T] \quad (4.1)$$

Esse tipo de estratégia de medição de indução se mostrou muito útil para os ensaios realizados, pois foi de fácil emprego, já que foi necessário apenas enrolar as bobinas nos locais pretendidos e fazer programas de aquisição e tratamento dos dados. Por conveniência, os sinais de tensão foram adquiridos, como já foi apresentado anteriormente, e tratados pelo programa Labview.

4.4.2 Ensaio de elevação de tensão

Este ensaio foi feito nos moldes do ensaio que é realizado na Embraco. Porém, ao invés de aumentar a tensão do primário até 220 V a 60 Hz, foi variado o valor da tensão do secundário até certo valor de tensão a 50 Hz. Foram utilizados 50 Hz por conveniência, visto que os osciloscópios utilizam escalas de tempo que são múltiplos deste valor de frequência. O valor de tensão máximo aplicado no barramento de corrente contínua da bancada foi de 100 V. Com esse valor de tensão já é possível chegar a valores de indução desejáveis.

No ensaio variou-se a tensão de pico do secundário de 1 a 12 V, com passos de 1 V, e de 12 a 20 V, com passos de 0,5 V. Em cada passo foram adquiridas a tensão do secundário e a corrente do primário e plotado o respectivo laço de integral da tensão em função da corrente, conforme mostra a figura 4.8.

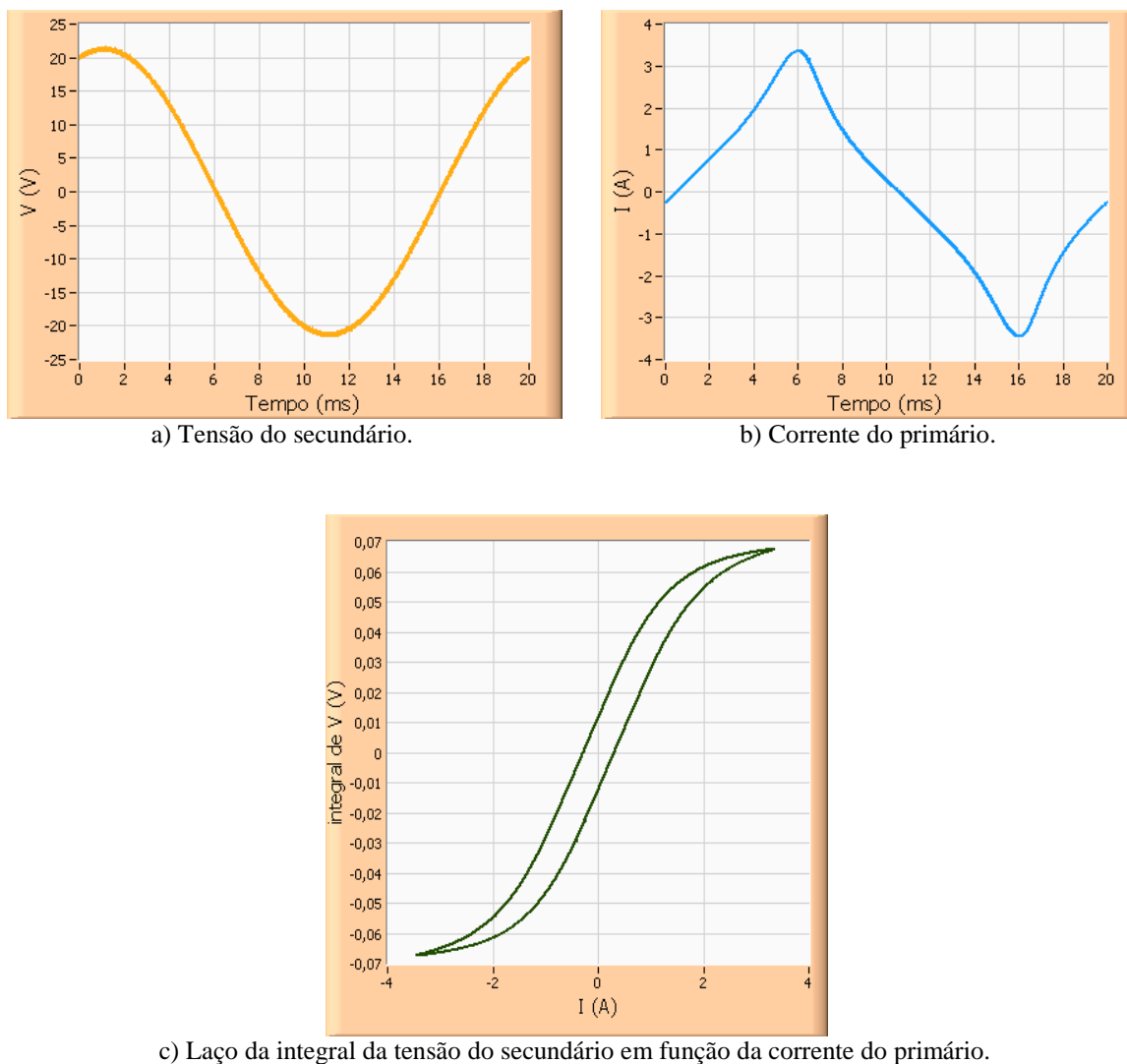


Figura 4.8 – Curvas do ensaio de elevação de tensão a 20 V no secundário.

Todos os pontos de todos os passos foram salvos em arquivos do tipo texto. Após todos os passos, foi feita a curva de tensão eficaz do secundário versus corrente eficaz do primário, conforme figura 4.9.

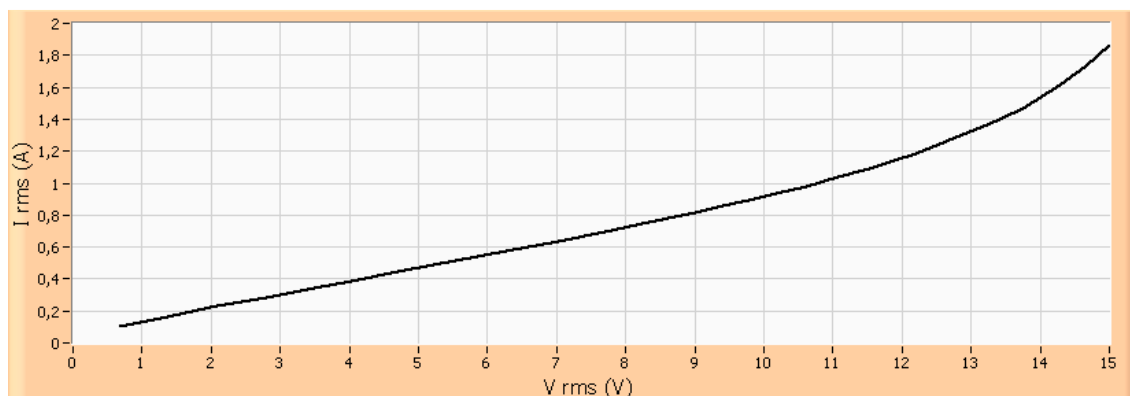


Figura 4.9 - Curva de corrente eficaz do primário versus tensão eficaz do secundário.

4.4.3 Ensaio do valor de indução na coroa do estator

A coroa é a parte externa aos dentes no estator, conforme a figura 4.10.

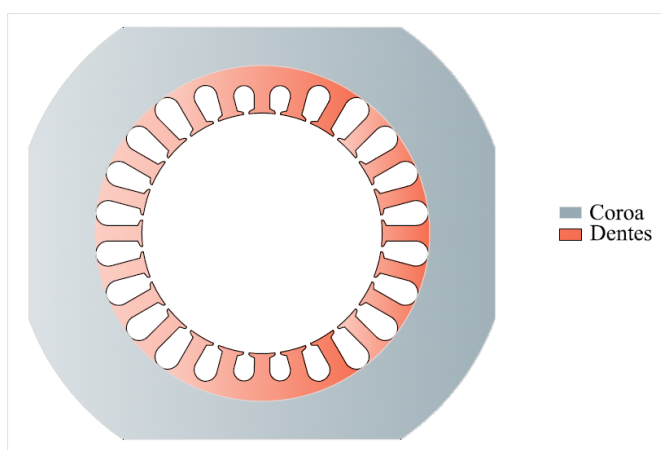


Figura 4.10 – Coroa e dentes do estator.

Para o ensaio do valor de indução na coroa do estator foram enrolados dois sensores de indução em duas partes diferentes da coroa. Com o testador de núcleo excitado foram feitas as aquisições dos sinais de tensão e os respectivos tratamentos para se obter as induções magnéticas. A figura a seguir mostra as posições onde foram adquiridas as induções, sendo que a sonda localizada na parte de cima da foto foi chamada de “1” e a da direita da foto, de “2”.

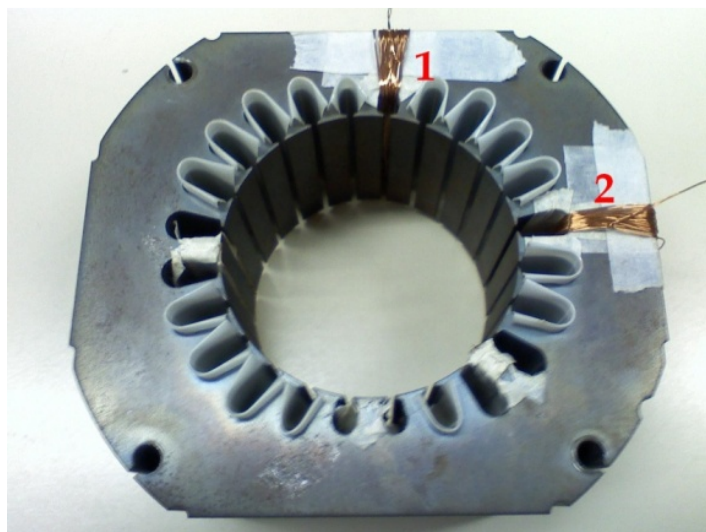


Figura 4.11 – Estator com os sensores de indução magnética na coroa.

Para uma melhor compreensão dos resultados será apresentado a carta do fluxo magnético da simulação do testador de núcleo.

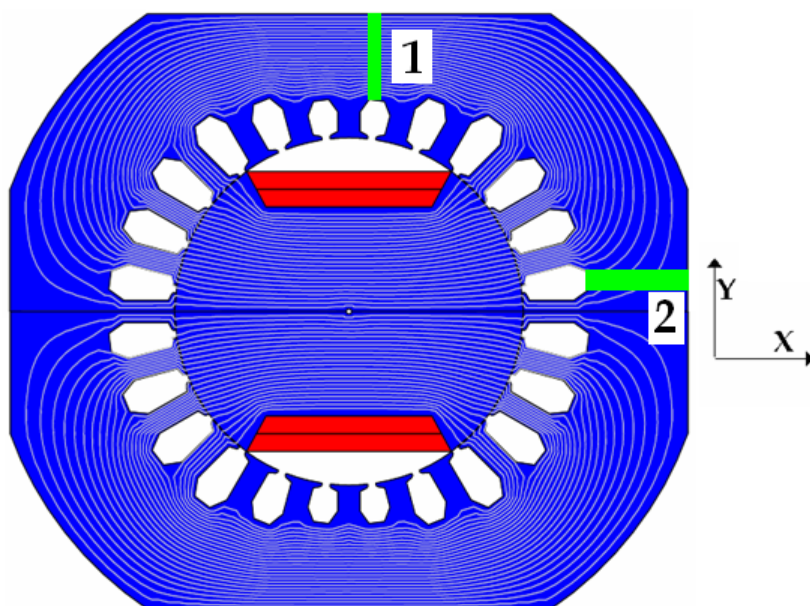
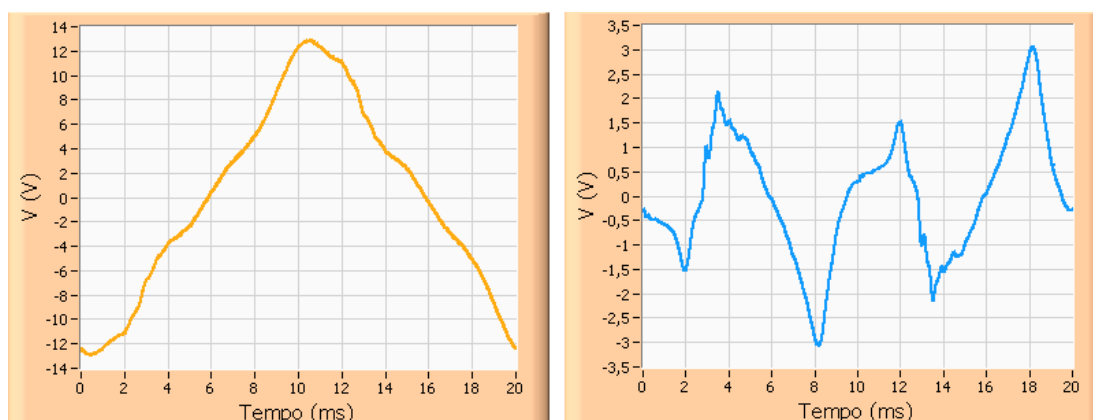
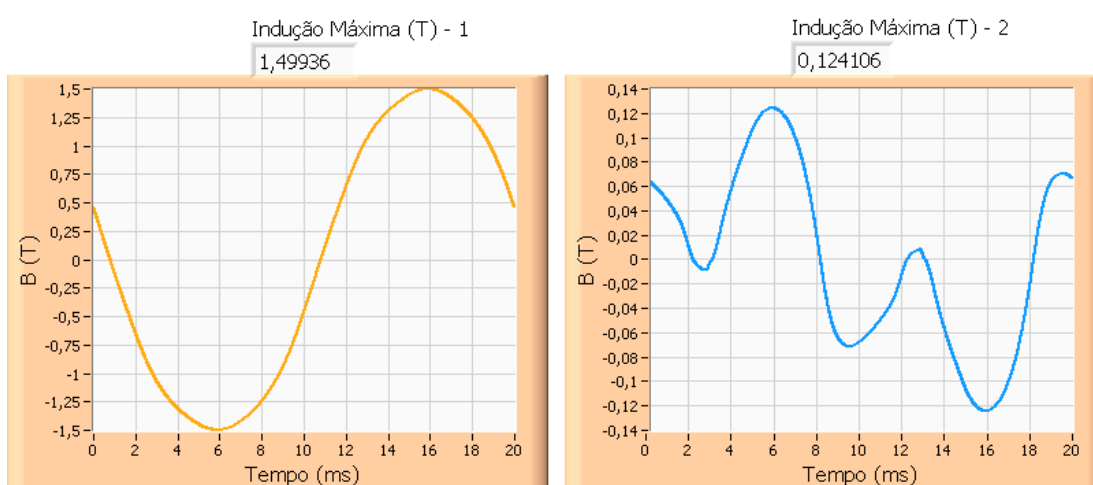


Figura 4.12 – Simulação das linhas de fluxo já apresentadas, porém com o estator inteiro.

A seguir se encontram os resultados deste ensaio para o testador de núcleo, onde a parte “a” representa as tensões nas espiras e a parte “b”, as induções, bem como seus valores máximos.



a) Tensões nos sensores de indução.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores.

Figura 4.13 – Ensaio do valor de indução na coroa.

Pode-se perceber que o ensaio realizado no testador de núcleo evidencia o que foi visto nas simulações. Enquanto o local do sensor 1 apresenta uma indução de quase 1,5 Tesla, no local do sensor 2 a indução é quase nula. Isso é facilmente visualizado na figura 4.12, na qual várias linhas de fluxo magnético atravessam o sensor 1 e poucas atravessam o sensor 2. Além disso, os valores máximos de indução medidos ficaram dentro da faixa dos valores simulados, como mostra a tabela 4.1.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,3 a 1,5	1,49936
2	0 a 0,19	0,12410

Tabela 4.1 – Comparação dos valores simulados e medidos.

4.4.4 Ensaio do valor de indução nos dentes do estator

Como visto anteriormente, na figura 4.10 os dentes são a parte mais interna do estator. Para o ensaio do valor de indução nos dentes foram feitos oito sensores, distribuídos no estator e numerados conforme a figura 4.14.

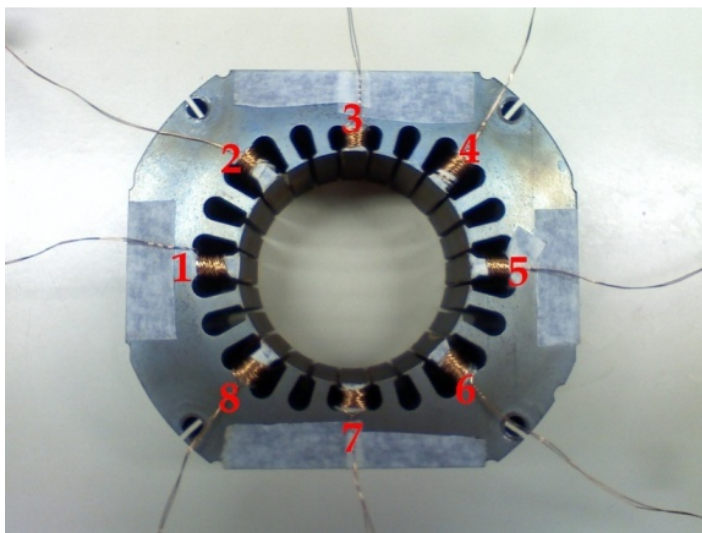


Figura 4.14 - Estator com os sensores de indução magnética nos dentes.

Neste ensaio utilizou-se a mesma magnitude de tensão utilizada no ensaio do valor de indução na coroa do estator. Para a aquisição e tratamento dos sinais utilizou-se o mesmo método do outro ensaio de averiguação de indução, porém, ao invés de se adquirirem duas tensões ao mesmo tempo, adquiriram-se quatro. O ideal seria adquirir as oito tensões ao mesmo tempo; contudo o osciloscópio que faz a aquisição dos sinais tem quatro canais. Nas figuras 4.15 e 4.17 são apresentados os resultados obtidos respectivamente para os dentes 1, 3, 5 e 7 e para os dentes 2, 4, 6 e 8.

Pela análise das respostas da figura 4.15 é possível observar que quase não há indução magnética nos dentes 3 e 7, o que vai de acordo com a simulação, visto que as linhas de fluxo não percorrem esses dentes, conforme a figura 4.16. As induções nos dentes 1 e 5 estão em oposição de fase. Isso pode ser explicado, pois o fluxo magnético percorre sentidos opostos nos dentes. Além disso, as amplitudes da indução magnética são diferentes nos dentes 1 e 5 devido à variação do entreferro no estator, pois um estator totalmente simétrico é de difícil produção em série. E, ainda, uma pequena variação do entreferro altera bastante o valor dos campos magnéticos.

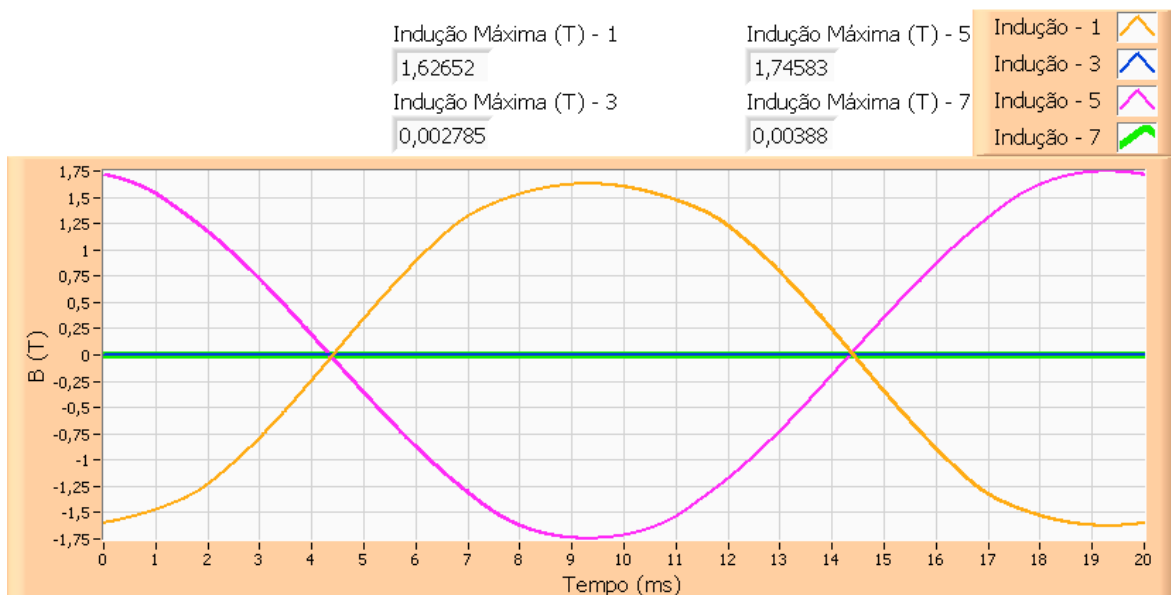
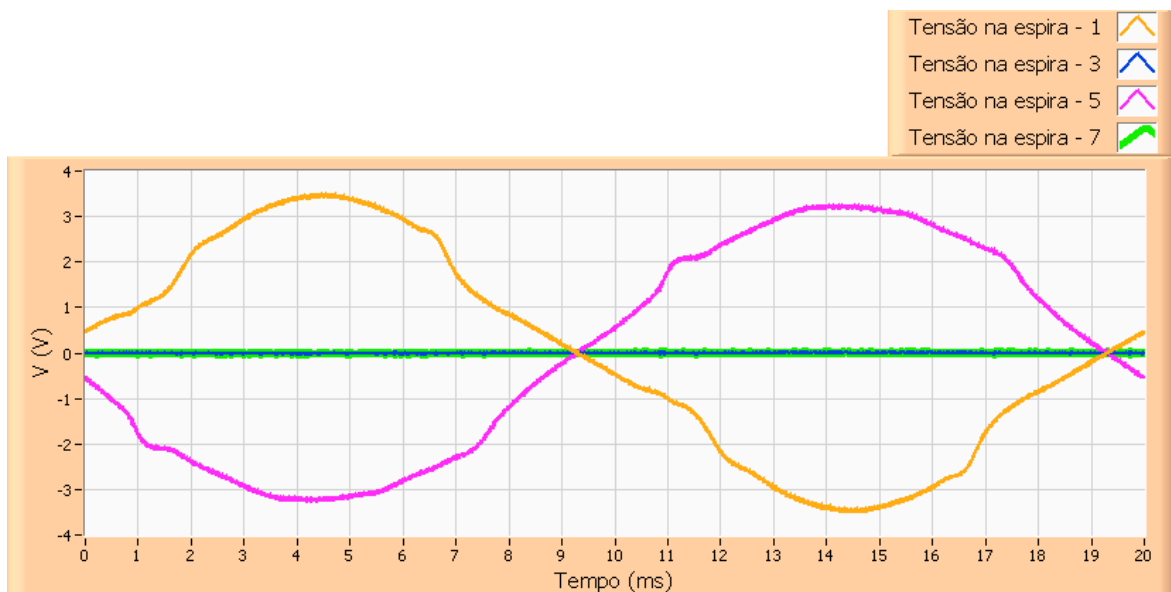


Figura 4.15 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,5 a 1,7	1,62652
3	0 a 0,19	0,00278
5	1,5 a 1,7	1,74583
7	0 a 0,19	0,00388

Tabela 4.2 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

Os valores máximos de indução da simulação foram bem próximos aos valores medidos para os dentes 1, 3, 5 e 7, como mostra a tabela 4.2.

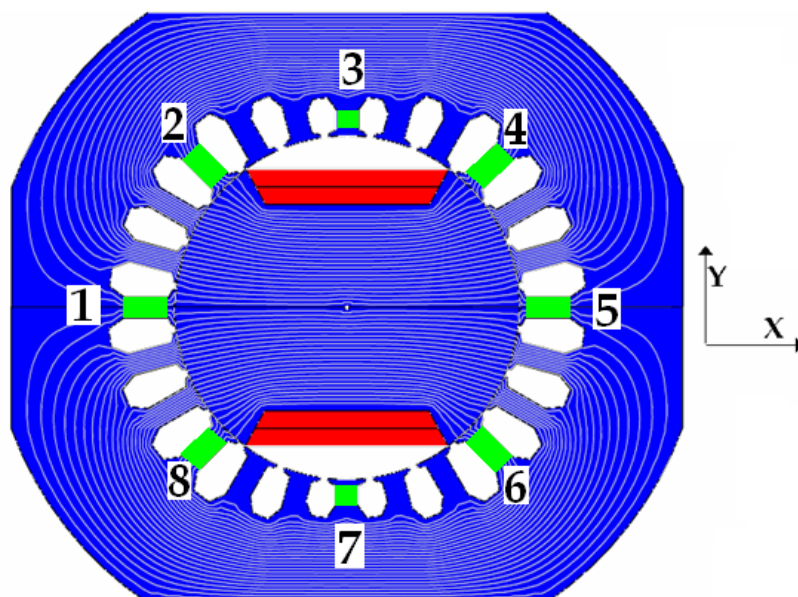


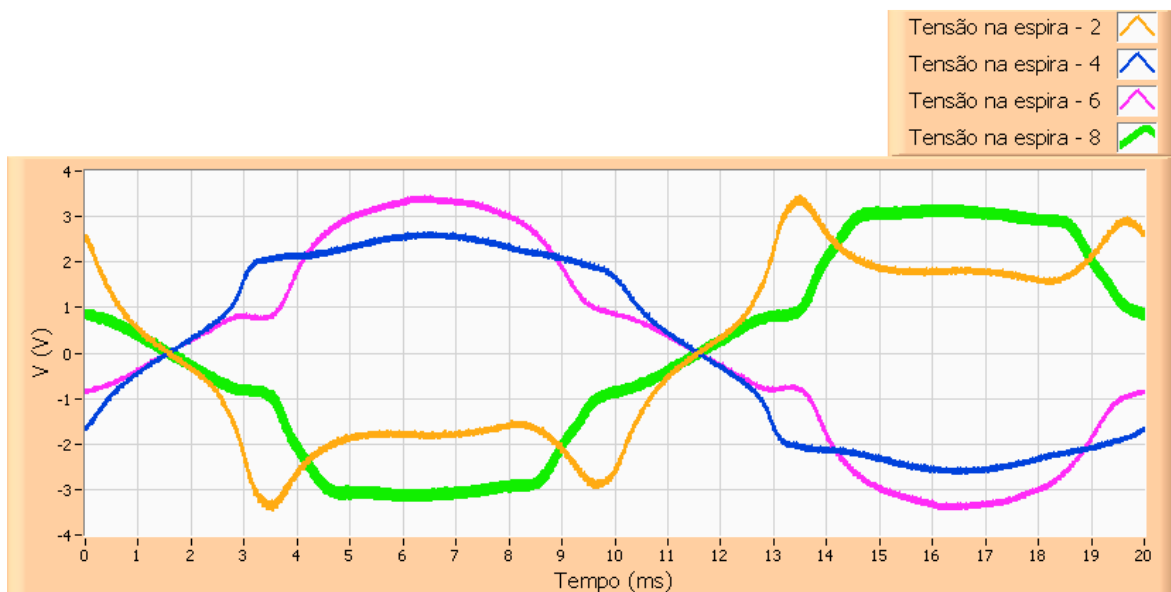
Figura 4.16– Simulação das linhas de fluxo já apresentadas, porém com o estator inteiro.

Os valores medidos de indução não ficaram na faixa dos valores simulados, como mostra a tabela 4.3. Essa diferença pode ser explicada pela variação do entreferro. Outro fator que pode resultar nesta diferença de indução é a utilização de uma corrente um pouco diferente na simulação em relação à prática.

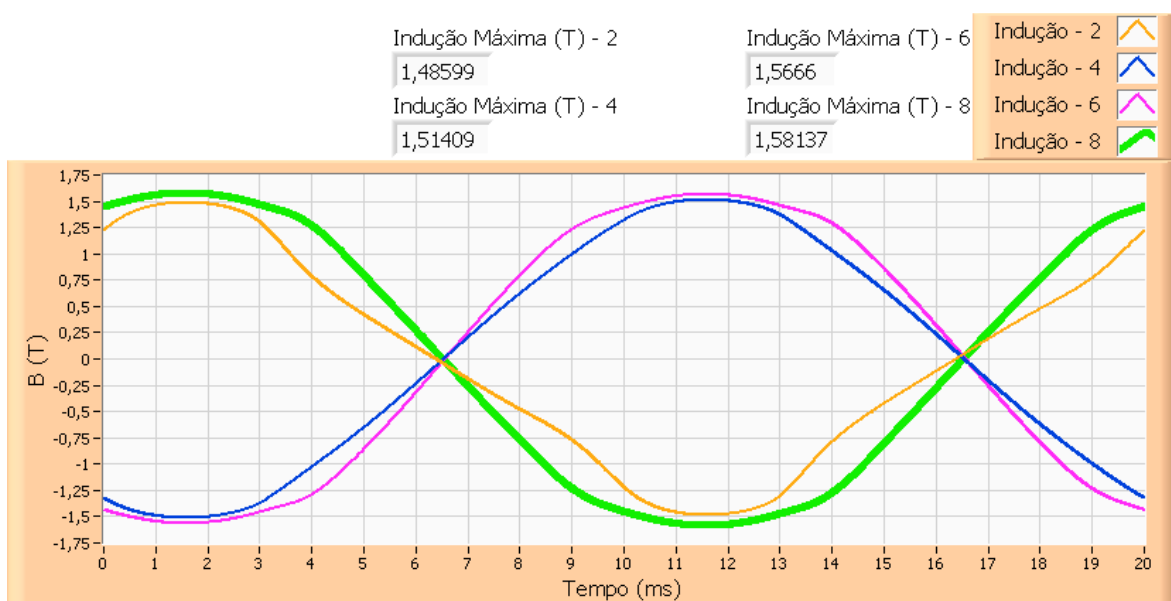
Segundo a análise da figura 5.17 as induções nos dentes 2 e 8 estão em fase, bem como nos dentes 4 e 6. Isso acontece, já que foi aplicado um campo alternante, assim o fluxo nesses dentes tem o mesmo sentido. A indução no dente 2 está em oposição de fase à presente no dente 4, bem como a que está no dente 8 em relação à presente no dente 6. Isso também era esperado, já que com a aplicação de um campo alternante o fluxo percorre um sentido em um dente e o sentido oposto no outro, conforme figura 4.16.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
2	1,1 a 1,3	1,48599
4	1,1 a 1,3	1,51409
6	1,1 a 1,3	1,56660
8	1,1 a 1,3	1,58137

Tabela 4.3 - Comparação entre os valores simulados e medidos.



a) Tensões nos sensores de indução 2, 4, 6 e 8.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 2, 4, 6 e 8.

Figura 4.17 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8.

5. Projeto de um Novo Dispositivo

Neste capítulo será apresentado o projeto de um dispositivo magnético capaz de ensaiar estatores sob campos rotacionais. Primeiramente serão mostradas as especificações, a escolha do material utilizado e as particularidades da montagem do protótipo, baseadas nos resultados dos estudos apresentados até aqui. Em seguida serão expostos os projetos intermediários desenvolvidos que precederam o projeto final.

5.1 Considerações Iniciais

Após os estudos do testador de núcleo e dos objetivos que se deseja atingir com esta pesquisa, foi desenvolvido um novo dispositivo magnético para ensaiar estatores sob campos rotacionais. Por ser um instrumento não usual e de uma estrutura não definida, utilizou-se um método empírico para desenvolver o novo dispositivo.

As especificações necessárias ao teste a 50 Hz, valor adotado por conveniência, foram:

- Todos os dentes do estator deveriam atingir um valor de indução magnética em torno de 1,5 Tesla.
- A coroa deveria atingir um valor de indução magnética maior que 1,3 Tesla.
- O núcleo do novo dispositivo não deveria atingir valores muito maiores de indução magnética do que o estator.
- As densidades de corrente aplicadas na excitação do novo dispositivo deveriam ser em torno de $4,5 \text{ A/mm}^2$ no cobre, podendo ser um pouco maiores. Este valor é tipicamente aplicado em desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos [11], logo, para um dispositivo de testes que não irá funcionar continuamente, é possível utilizar valores de densidade de corrente um pouco superiores. Esta condição é de difícil acerto, pois na simulação foi considerada a área da ranhura inteira como cobre.
- As ranhuras deveriam ser suficientemente grandes para abrigarem os enrolamentos de excitação e os sensores. Este critério foi analisado através de cálculos de fator de ocupação dos enrolamentos [12].

5.2 Formação do Campo Girante

Por ser um teste de campo girante, é necessária a utilização de não mais apenas um enrolamento de excitação, como no testador de núcleos, mas no mínimo dois. Logo, para se ter campo girante, são necessários dois enrolamentos espaçados de 90 graus no espaço e alimentados com correntes senoidais defasadas de 90 graus elétricos no tempo. A figura 5.1 ilustra como é formado o campo girante: o eixo magnético da curva azul é defasado de 90 graus em relação ao da curva vermelha, e a curva de campo em azul está defasada de 90 graus no tempo em relação à curva vermelha; a forma de onda roxa é a soma da forma de onda sinusoidal em vermelho com a forma de onda sinusoidal em azul.

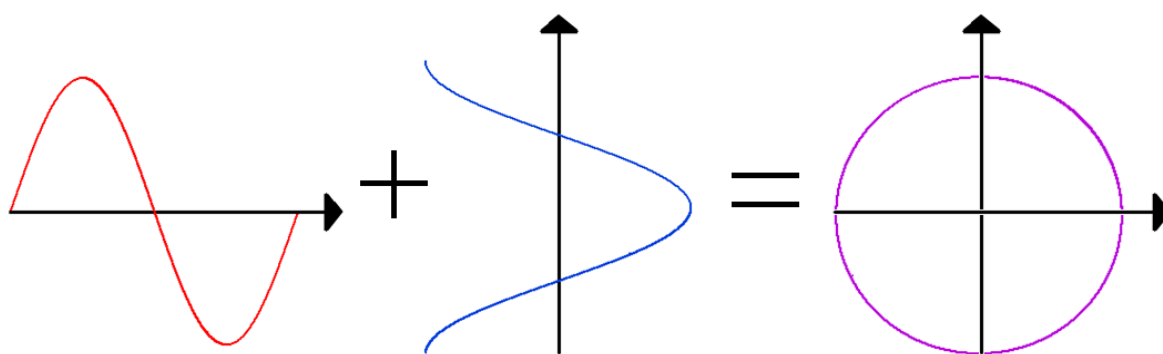


Figura 5.1 – Composição dos campos rotacionais.

5.3 Os Enrolamentos e as Ranhuras

Para se obter uma força magnetomotriz (f.m.m.) com uma distribuição o mais senoidal possível no entreferro foram utilizados, ao invés de um enrolamento de excitação para cada eixo, enrolamentos distribuídos para cada eixo. Essa distribuição de enrolamentos resulta na atenuação de algumas componentes harmônicas [12]. Para conseguir uma distribuição da f.m.m. o mais sinusoidal possível seria necessário o maior número possível de ranhuras, o que é limitado em função do espaço do novo dispositivo.

O projeto das novas ranhuras e dentes do protótipo foi feito conforme o formato do testador de núcleo e do estator a ser ensaiado. O número de ranhuras foi escolhido conforme o espaço disponível, como mostra a figura 5.2. Para cada três ranhuras no estator foi projetada uma ranhura no dispositivo, utilizando-se retas paralelas aos dentes do

estator. Como o estator tem vinte e quatro ranhuras, o protótipo tem oito ranhuras igualmente espaçadas.

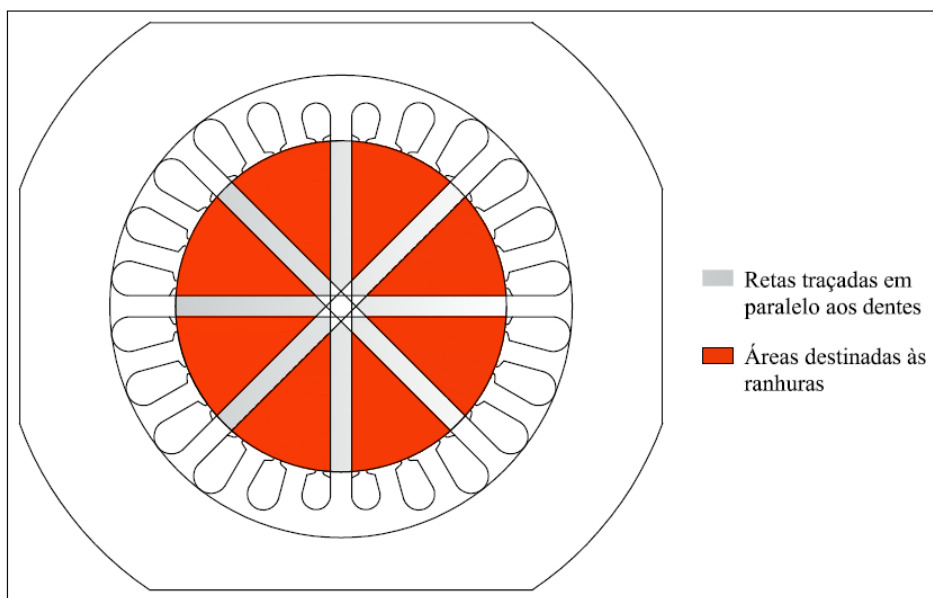


Figura 5.2 – Definição do número de ranhuras do novo dispositivo.

Logo as ranhuras deveriam ser grandes o suficiente para se poder alocar o número de fios necessários para ensaiar o estator, e pequenas o suficiente para que o núcleo não saturasse. Isso ocorre, pois se as ranhuras são muito grandes, o mesmo fluxo magnético que iria passar em uma quantidade de aço maior irá passar em uma quantidade de aço menor, fazendo assim com que a indução magnética seja maior, saturando-o. Uma saturação grande do núcleo faz com que o ensaio não seja adequado, como foi explicado anteriormente.

Com o número de ranhuras definido foi decidido como seria o esquema de bobinagem para se obter um campo girante. Com a escolha de se utilizar enrolamentos distribuídos foi determinado que todas as ranhuras seriam preenchidas tanto por enrolamentos de excitação (primário) dos dois eixos, como por enrolamentos sensores (secundário) dos dois eixos. A figura 5.3 apresenta como ficou o esquema de bobinagem, sendo que a “Fase 1” considera as bobinas para um eixo e “Fase 2”, as de outro eixo. Além disso, a denominação “Positiva” é onde as bobinas entram e “Negativa”, onde elas saem.

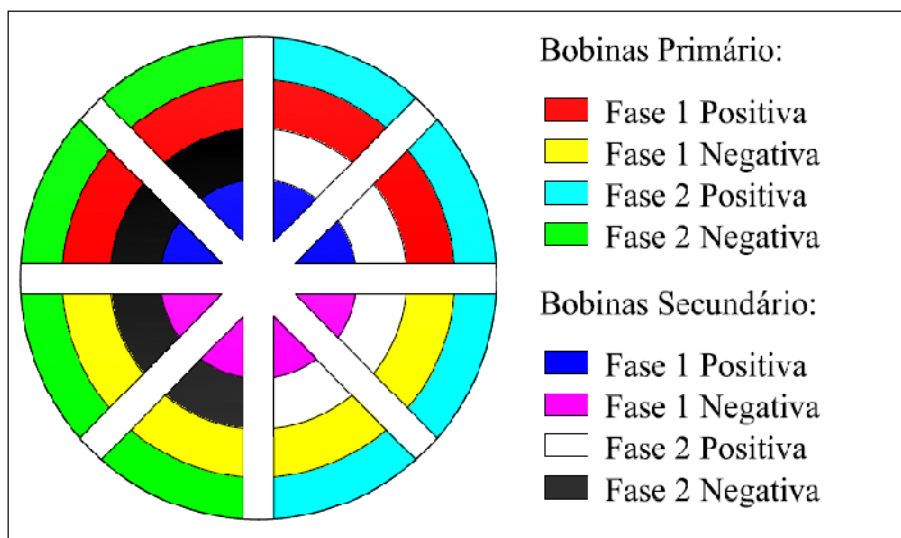


Figura 5.3 – Esquema de bobinagem.

Para obter uma f.m.m. com uma distribuição senoidal em cada fonte não basta apenas os enrolamentos serem distribuídos ao longo do novo dispositivo, é necessário que cada ranhura tenha uma porcentagem diferente de corrente de cada fonte de excitação. Com esse objetivo, foi feito um cálculo da porcentagem de distribuição de cada bobina em cada ranhura.

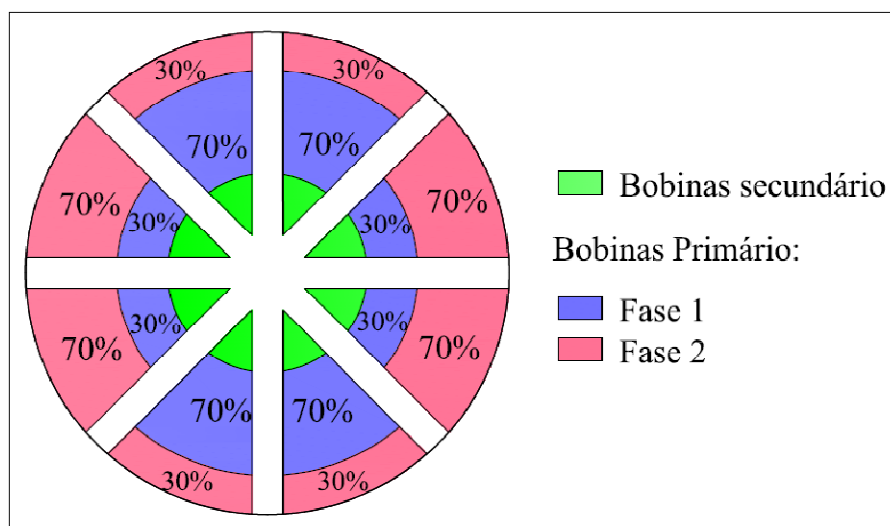


Figura 5.4 – Distribuição das ranhuras.

Para 8 ranhuras o resultado foi que haveria dois tipos de bobinas: umas maiores, ocupando 70% do total da ranhura destinado ao primário, e outras menores, ocupando os

30% restantes. Para as bobinas secundárias utilizou-se a mesma distribuição utilizada para as bobinas primárias. A figura 5.4 apresenta como ficou a distribuição das bobinas nas ranhuras, sendo que a ilustração apresenta apenas a distribuição para as bobinas primárias.

A comprovação de que com essa configuração obteremos uma f.m.m. com distribuição sinusoidal é vista na figura 5.5, mostrando a distribuição da força magnetomotriz obtida pelo cálculo das contribuições de cada bobina, vistas a partir de um ponto no estator, bem como uma onda sinusoidal de referência. Uma explicação de como foi realizado o cálculo encontra-se no anexo 8.4.

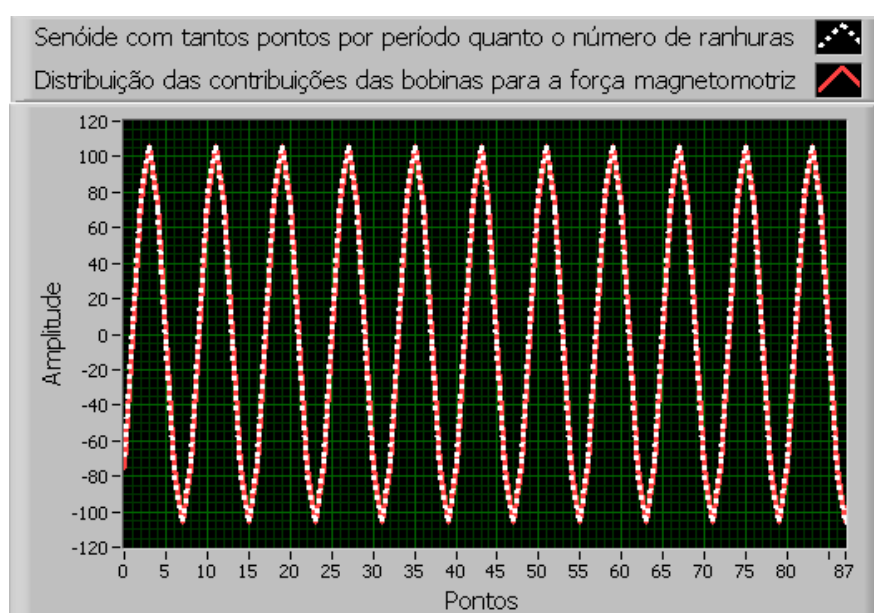


Figura 5.5 – Distribuição da força magnetomotriz.

5.4 O Material

Um importante passo para o desenvolvimento do projeto foi a escolha de um material para o novo núcleo do dispositivo. O material utilizado não poderia ser de grão orientado, como no testador de núcleo. Para tal, foi utilizada a melhor chapa de grão não orientado, em termos de perdas, que estava disponível na Embraco quando o dispositivo foi projetado. É um aço silício fabricado pela Acesita [13] com referência número E125, cuja curva BH é apresentada na figura 5.6.

É importante que este material tenha perdas menores que as do material utilizado nos estatores, normalmente o E230 da Acesita. Assim, a perda no núcleo não será relativamente grande em relação à perda do estator. A figura 5.6 apresenta as curvas de

indução magnética em função do campo magnético para o material E125, com o qual foi construído o novo dispositivo, e o E230, que é o material típico dos estatores produzidos pela Embraco. Pela análise das curvas é possível perceber que o aço E125 não é melhor em termos de permeabilidade que o aço E230, porém as menores perdas podem ser explicadas, pois as lâminas de E125 são mais finas e possuem menores perdas por corrente de Foucault.

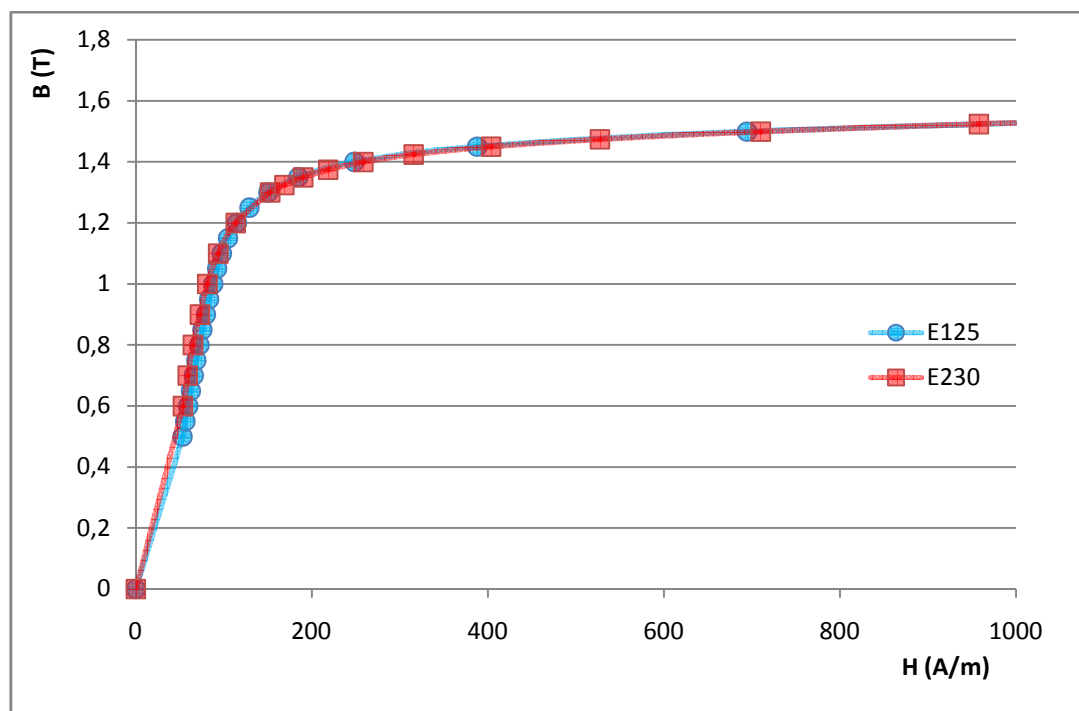


Figura 5.6 – Detalhe da curva de indução magnética em função do campo magnético.

5.5 Montagem

Para a construção do novo dispositivo foi feito um núcleo laminado, visto que se este fosse sólido, iria acarretar em perdas muitos grandes, devido às correntes de Foucault. A altura escolhida do pacote de lâminas foi de 55 milímetros, a mesma do testador de núcleo.

As chapas de grãos não orientados não são totalmente isotrópicas, ou seja, elas possuem em um sentido uma propensão maior à passagem dos campos magnéticos que em outro sentido. Isso para o novo dispositivo é uma característica ruim, já que seria desejável que o dispositivo não favorecesse a passagem do campo em nenhum sentido, tendo-se assim um campo o mais perfeitamente girante. Foi utilizado um artifício para tentar

diminuir essa anisotropia na hora da montagem do núcleo. Este artifício consiste em rotacionar, na hora da montagem, cada chapa com um ângulo de 45 graus em relação à anterior, para que com isso a anisotropia fosse dividida por todo o núcleo. A figura 5.7 apresenta um esquema da montagem do novo dispositivo.

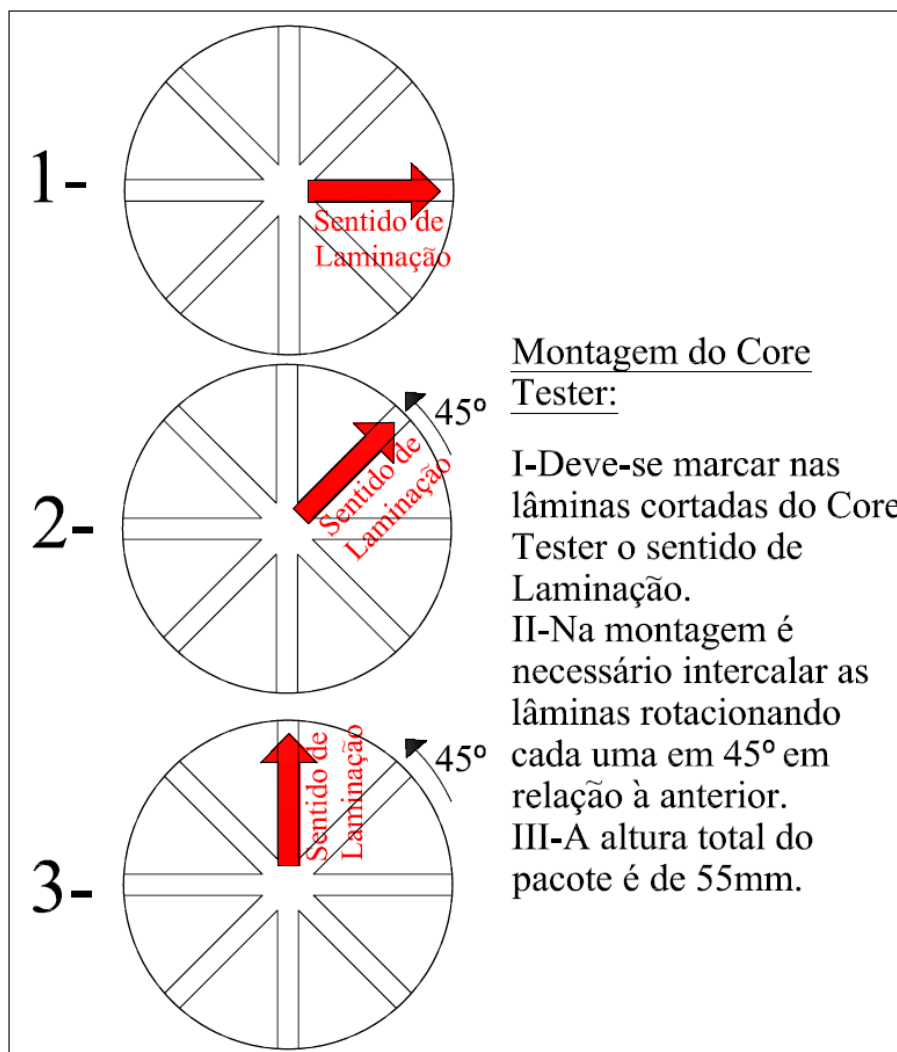


Figura 5.7 – Esquema de montagem para diminuir a anisotropia.

5.6 Projetos

Para os projetos foi utilizado o mesmo software utilizado anteriormente para as simulações do testador de núcleo, o EFCAD [10]. Foi feito um projeto baseado no formato do testador de núcleo. A seguir, foi simulado esse primeiro projeto e com os resultados obtidos foram feitas algumas modificações. Com essas modificações, foi feita uma nova

simulação e, conforme os resultados obtidos, foram realizadas mais alterações. Dessa forma, o desenho do dispositivo foi sendo alterado e simulado, até que se atingiu um projeto final que atendesse os requisitos. Os projetos e as modificações serão apresentados nas próximas seções.

Na simulação foram considerados novamente apenas os casos extremos de funcionamento, ou seja, foi utilizada uma corrente contínua no valor da corrente máxima das senóides aplicadas. Logo, foi necessário simular o equipamento funcionando para os dois casos extremos, que ocorrem em alternância de tempo: quando a fase 1 está no máximo e a 2 no mínimo, e vice-versa. Fazendo uma composição das duas fontes atuando ao mesmo tempo, tem-se um campo girante.

Além disso, novamente não foi necessária a utilização de todo o domínio de cálculo representando o equipamento todo para a simulação utilizou-se apenas as metades do testador de núcleo e do estator, para os dois casos. O material utilizado nas as lâminas do estator foi o mesmo e com as mesmas dimensões do que o utilizado na simulação do testador de núcleo. O material utilizado no núcleo do novo equipamento foi o aço E125.

O entreferro utilizado nas simulações foi de 0,05 mm, como foi explicado anteriormente. Para as simulações serão apresentados somente os fluxos magnéticos do primeiro projeto, visto que para os outros projetos o fluxo percorre o mesmo caminho nos estatores e não fornece um resultado do qual é possível tirar alguma conclusão para o desenvolvimento do protótipo.

5.6.1 Projeto 1

O primeiro projeto foi baseado na figura 5.2, onde se determinou os limites de cada ranhura. Logo, foi delimitada a profundidade que cada ranhura teria e o espaço que haveria entre o entreferro e as ranhuras. Foi delimitado, também, o espaço no qual se colocariam os enrolamentos. A figura 5.8 apresenta como ficou o primeiro projeto.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram as simulações realizadas para uma corrente de 10 A/mm². Foi utilizado esse valor de corrente, que é muito maior que a consideração inicial de 4,5 A/mm², para mostrar que, mesmo utilizando uma corrente muito maior, as induções no estator não atingem os valores pretendidos.

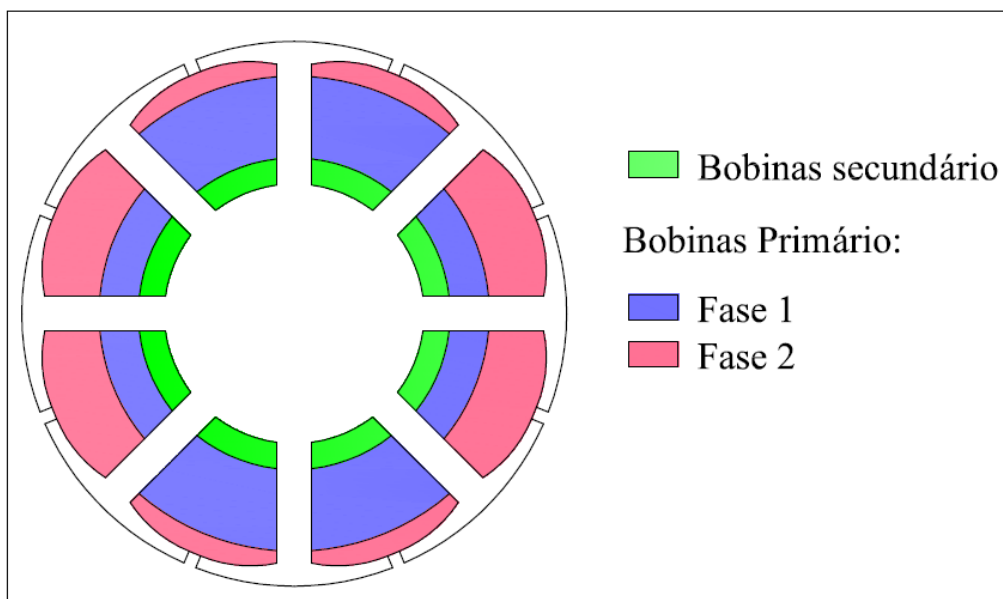
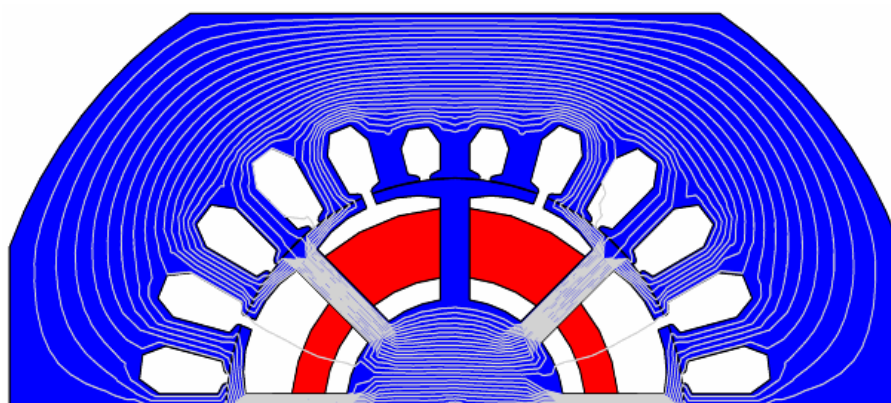
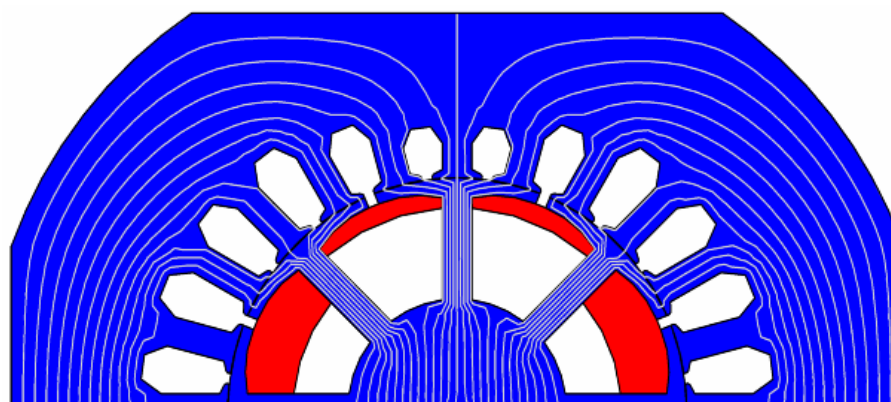


Figura 5.8 – Projeto 1.



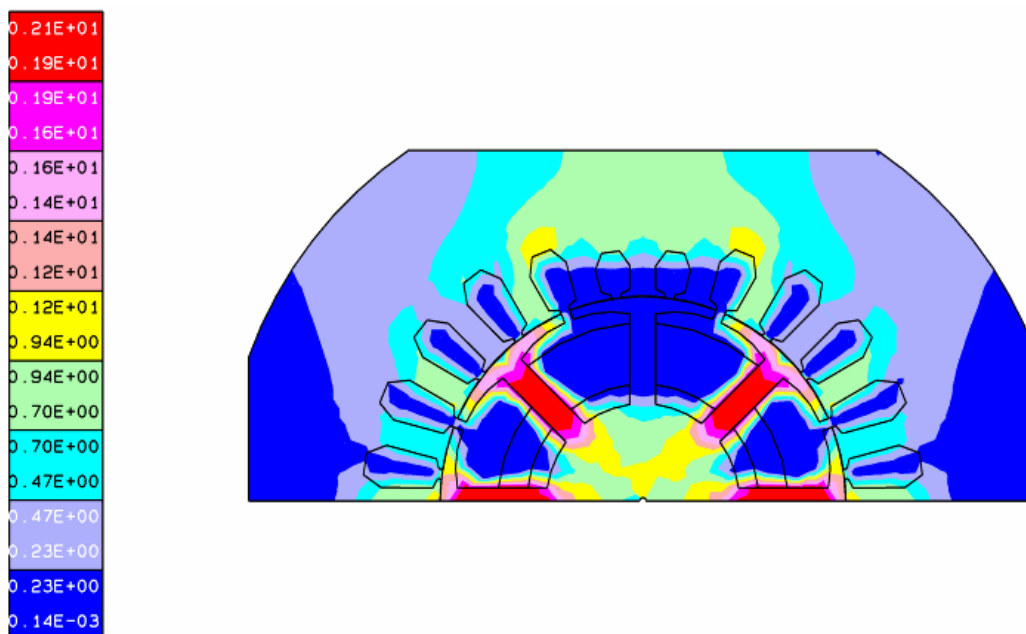
a) Fluxo magnético com excitação na fase 1.



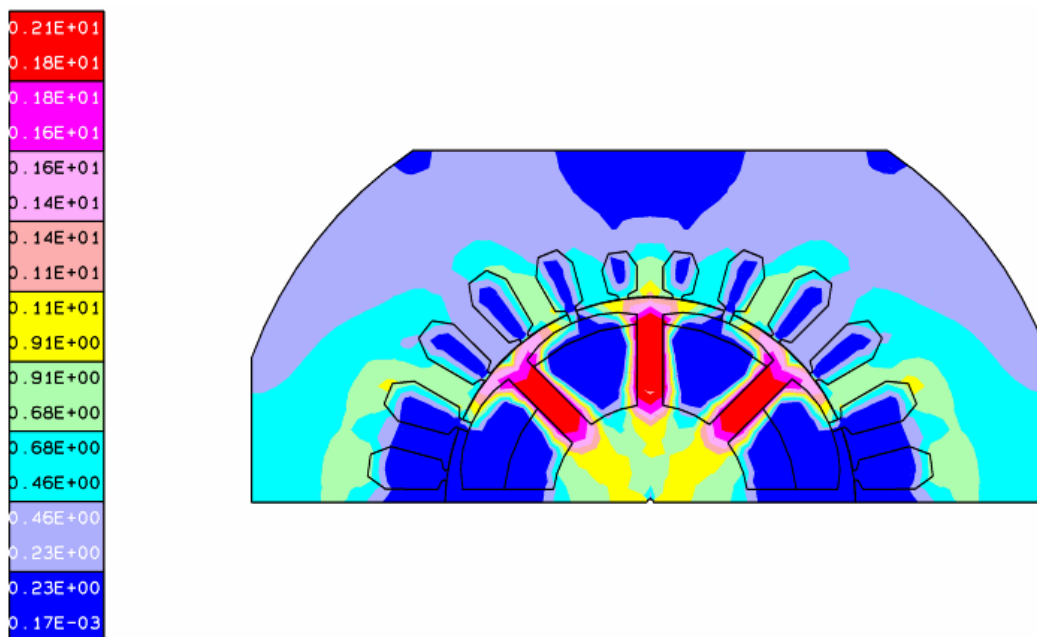
b) Fluxo magnético com excitação na fase 2.

Figura 5.9 – Fluxo magnético do projeto 1.

Analizando a distribuição do fluxo magnético, observa-se que o fluxo atravessa todos os dentes, o que era desejado. Porém, pelas cartas de induções é possível observar que nenhum dos dentes do estator atinge a indução necessária. Além disso, o núcleo do novo dispositivo atingiu valores muito grandes de indução magnética, já que a densidade de corrente (10 A/mm^2) é elevada.



a) Carta de indução com excitação na fase 1.



b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.10 – Cartas de indução do projeto 1, valores em Tesla.

5.6.2 Projeto 2

Para o segundo projeto decidiu-se então diminuir a área das ranhuras para se obter menos saturação no núcleo do novo dispositivo. Foram feitas ranhuras com lados opostos aproximadamente paralelos, figura 5.11.

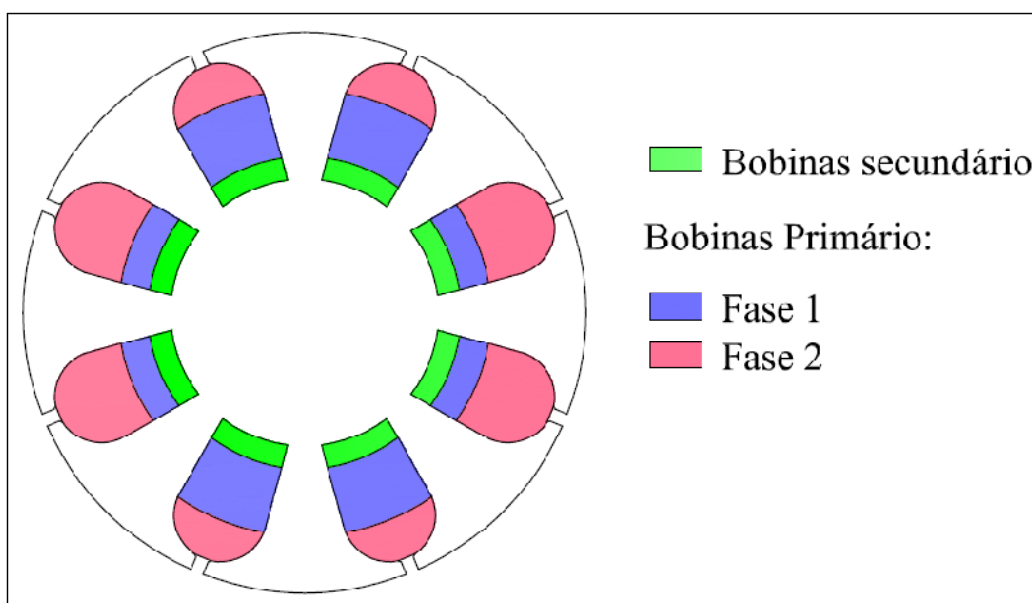
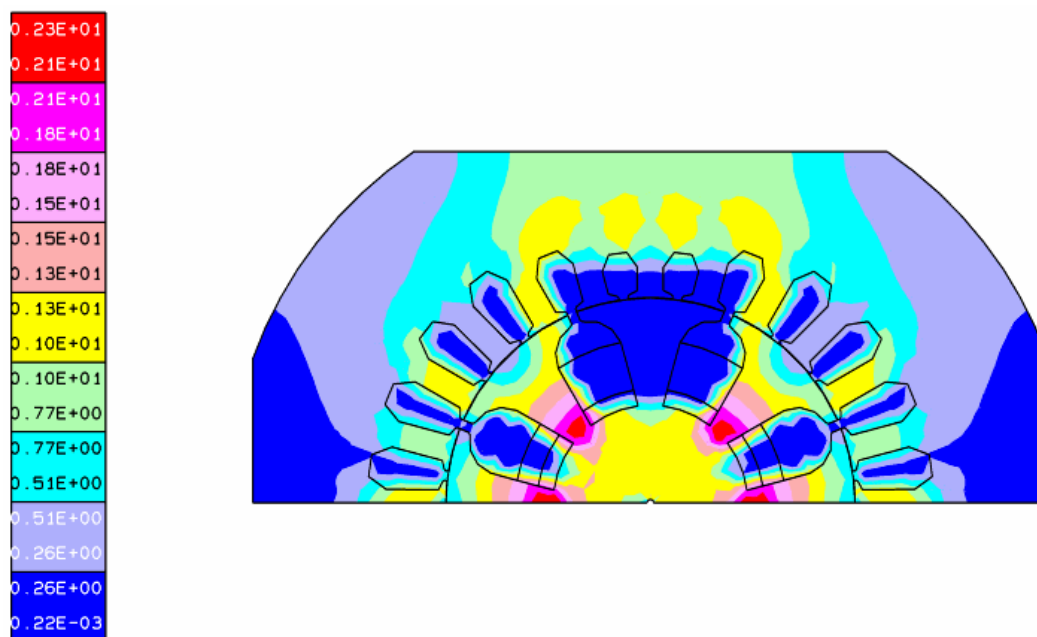


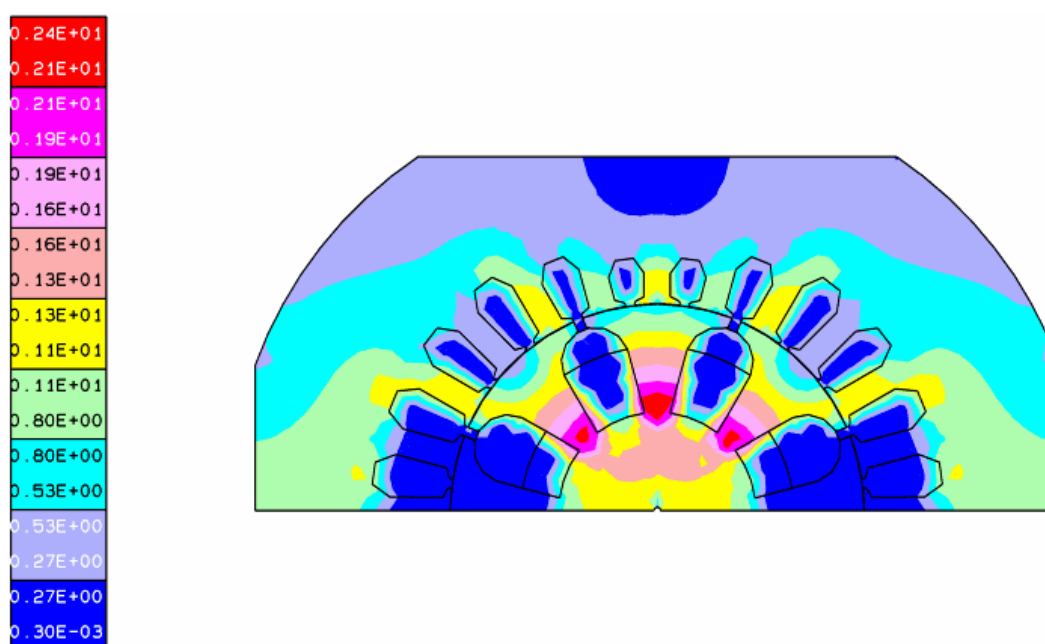
Figura 5.11 – Projeto 2.

Após a concepção deste projeto foi feita a simulação utilizando uma densidade de corrente de 6 A/mm^2 , cujas cartas de indução são apresentadas a seguir. Como no projeto anterior, a corrente foi superdimensionada com o intuito de mostrar que, mesmo se aplicando valores maiores de corrente, o projeto não funciona como deveria.

Pela análise das cartas de indução do projeto 2 (figura 5.12) é possível perceber que a redução do tamanho das ranhuras fez com que o núcleo do dispositivo saturasse menos e, dessa forma, a indução nos dentes do estator aumentou. No entanto, a corrente de excitação ainda está alta e a indução no núcleo está maior do que a indução no estator. Foi possível perceber que, quando não se utilizam dentes com larguras constantes, ocorre uma saturação maior na região em que os dentes se afinam. Assim, será necessário utilizar sempre dentes com lados que sejam paralelos.



a) Carta de indução com excitação na fase 1.



b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.12 – Cartas de indução do projeto 2, valores em Tesla.

5.6.3 Projeto 3

No terceiro projeto a única modificação realizada foi que, ao invés de se utilizar ranhuras com lados opostos paralelos entre si, utilizaram-se ranhuras com lados de largura constante. Isso fez com que as áreas das ranhuras diminuíssem e os tamanhos dos dentes aumentassem. A figura 5.13 mostra o desenho do novo projeto.

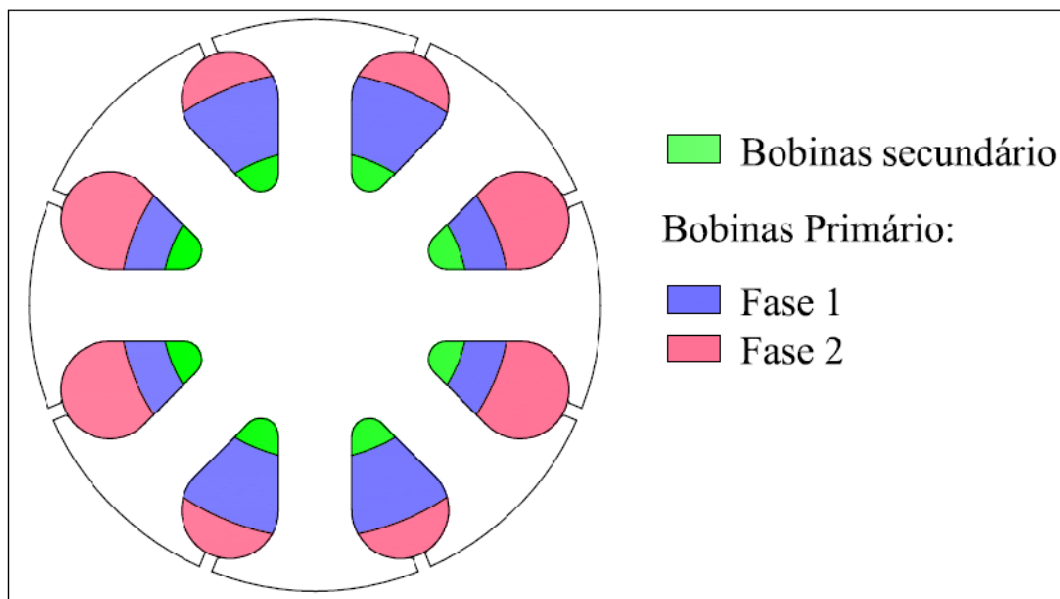
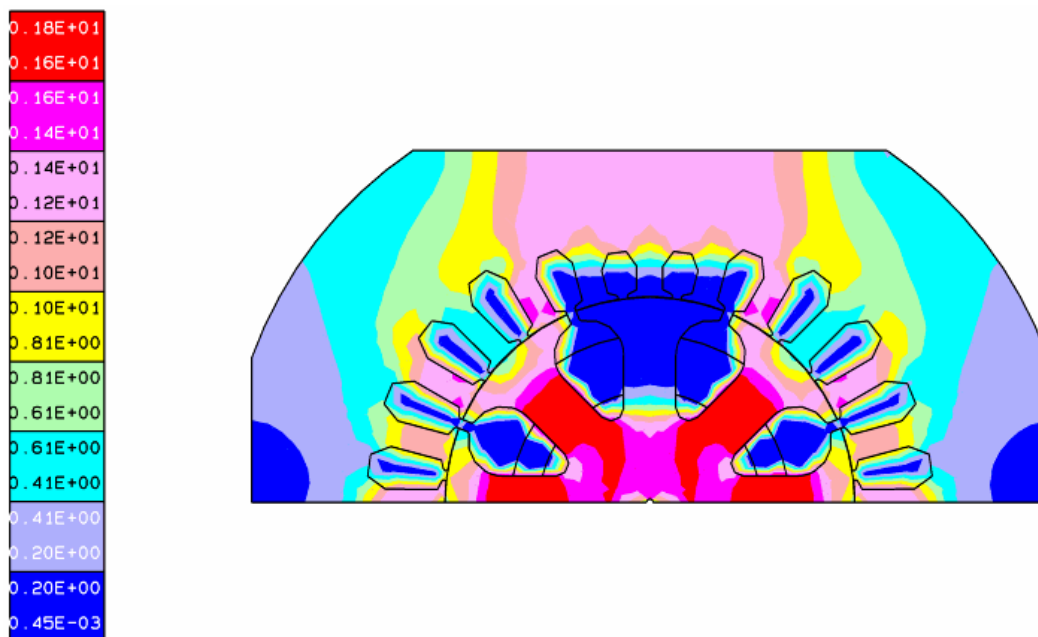
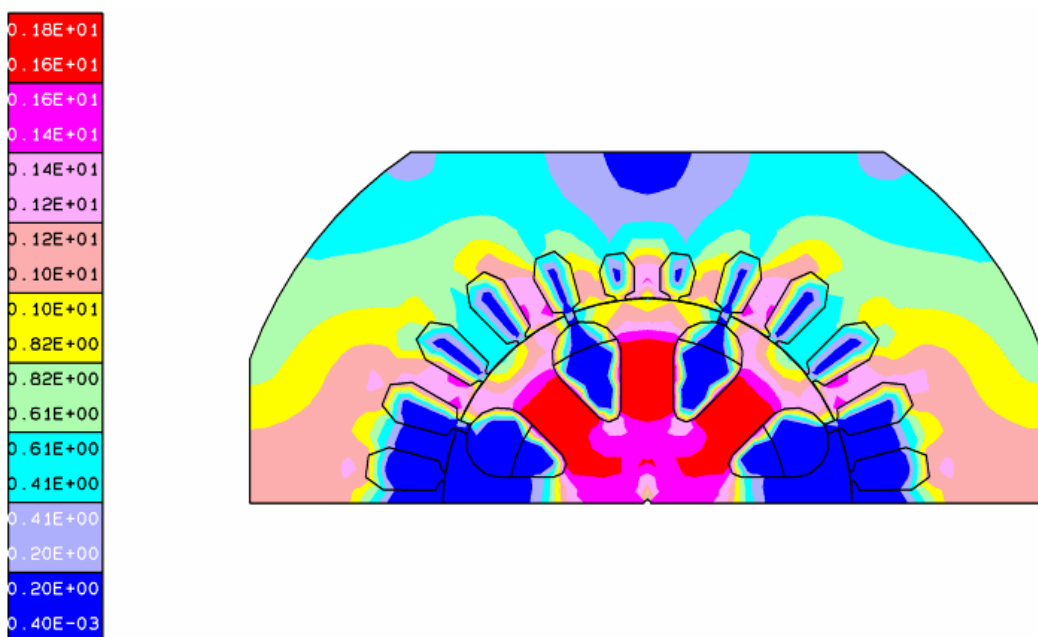


Figura 5.13 – Projeto 3.

Nas simulações do projeto 3 foi aplicada uma densidade de corrente de $2,5 \text{ A/mm}^2$. Na figura 5.14 é apresentada as cartas de indução das simulações realizadas. Na figura é possível observar que os níveis de indução atingidos nos dentes e na coroa do estator foram satisfatórios e o núcleo saturou de maneira mais uniforme. Porém, os níveis de indução do núcleo do projeto 3 foram bem maiores do que os nos dentes do estator.



a) Carta de indução com excitação na fase 1.



b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.14 – Carta de indução do projeto 3, valores em Tesla.

5.6.4 Projetos 4 – 5 – 6 – 7 – 8

Para os projetos 4, 5, 6, 7 e 8 foi utilizado o mesmo formato das ranhuras da do núcleo do projeto 3, já que este estava adequado para o pretendido. Porém, era necessário ajustar o tamanho das ranhuras. Logo, foram feitos vários projetos com áreas de ranhuras diferentes, e observou-se quais destes atendiam melhor ao desejado. A seguir serão mostrados os projetos 6 e 8, que são aqueles que possuem ranhuras um pouco menores e um pouco maiores do que as do projeto final, respectivamente.

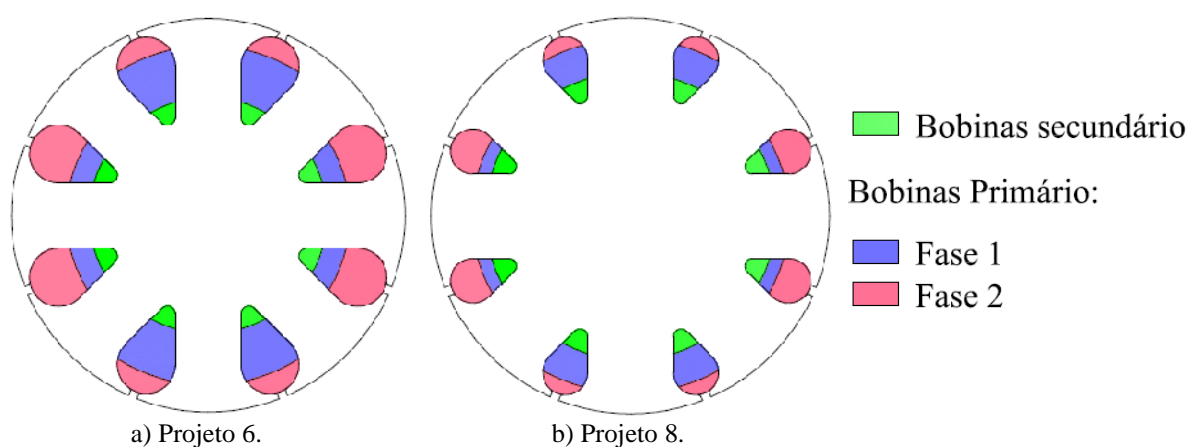
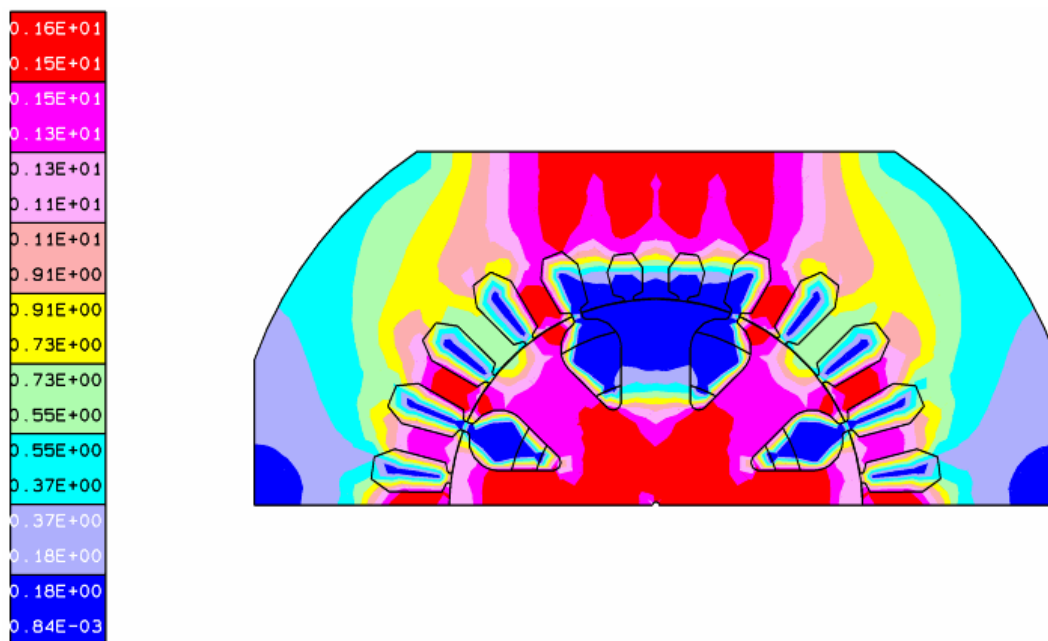


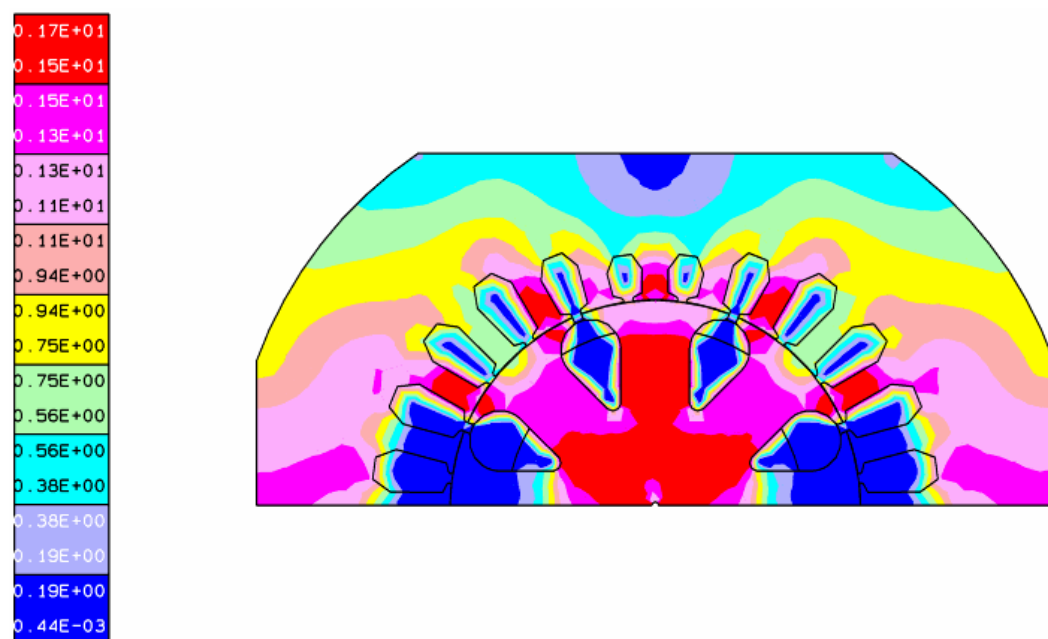
Figura 5.15 – Projeto 6 e 8.

A figura 5.16 e 5.17 mostram as cartas de indução dos projetos 6 e 8, respectivamente. Para o projeto 6 utilizou-se uma densidade de corrente de 2 A/mm^2 e para o projeto 8 utilizou-se $2,5 \text{ A/mm}^2$.

Pode-se perceber, analisando as cartas de indução destas figuras, que para o projeto 6 as induções em alguns dentes ficaram menores do que no núcleo, o que não é desejado. Já para o projeto 8 o resultado da carta de indução foi bom, porém foi exigido um valor de corrente mais alto do que no projeto final, como será visto na próxima seção, o que inviabilizou o projeto.

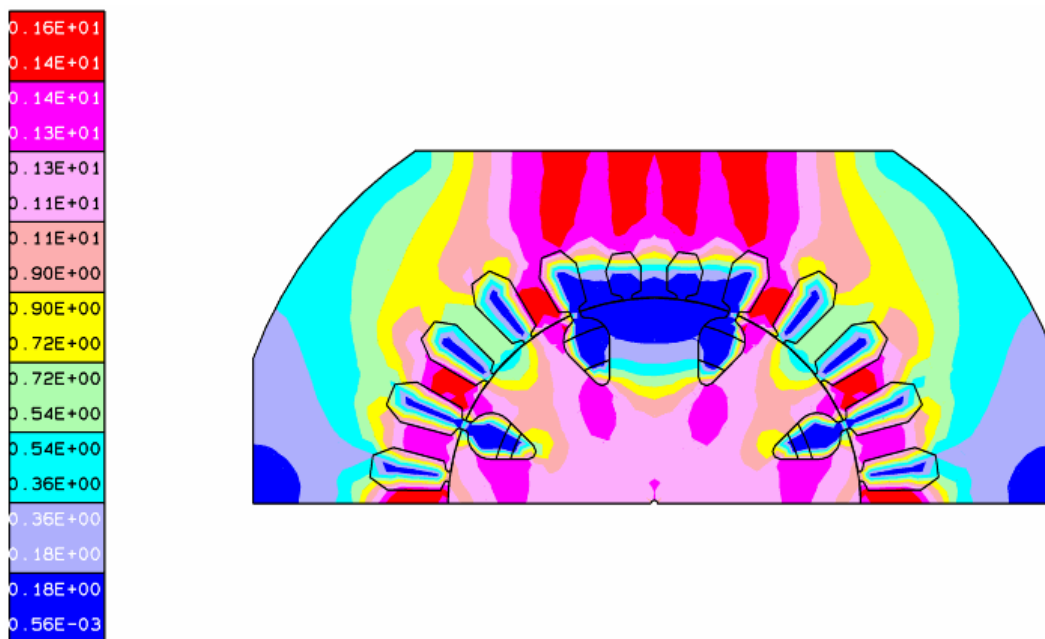


a) Carta de indução com excitação na fase 1.

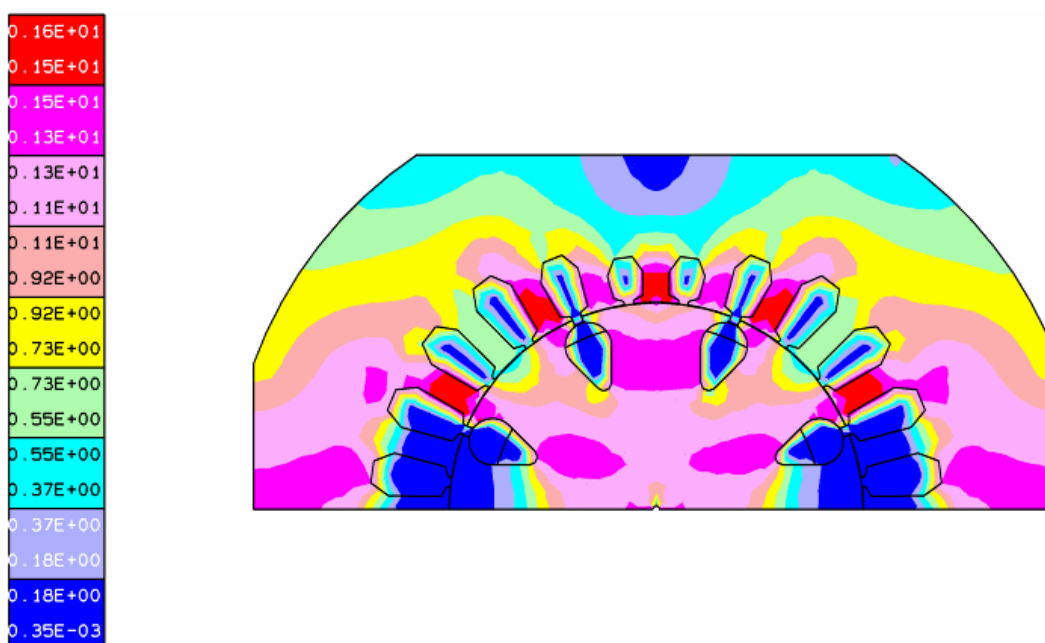


b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.16 – Cartas de indução do projeto 6, valores em Tesla.



a) Carta de indução com excitação na fase 1.



b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.17 – Cartas de indução do projeto 8, valores em Tesla.

5.7 Projeto Final

O projeto final escolhido conforme os critérios apresentados foi o projeto 7. A seguir é apresentada a ilustração do projeto, cujas cotas se encontram no Anexo 8.5.

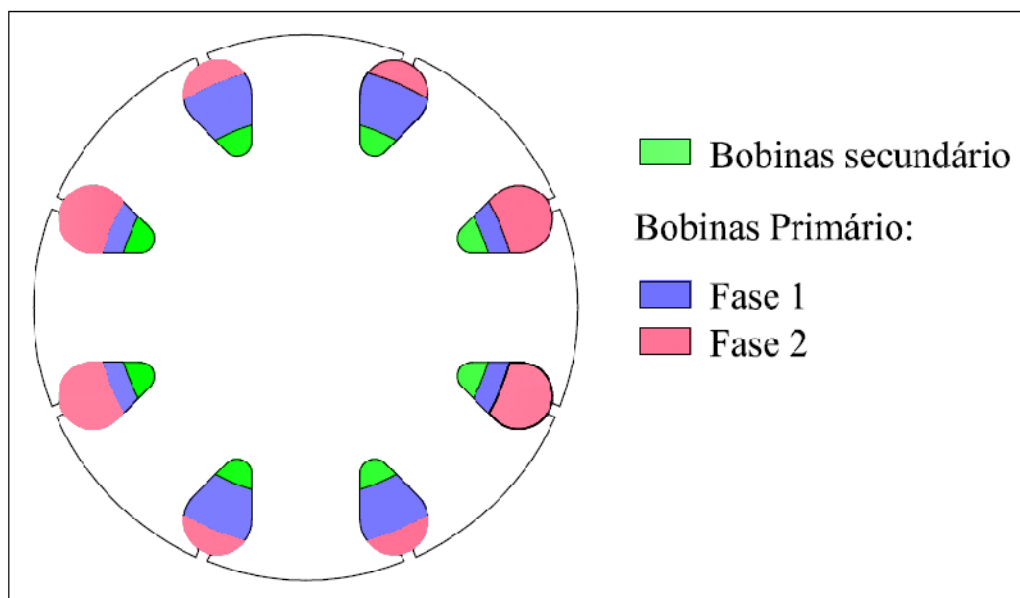
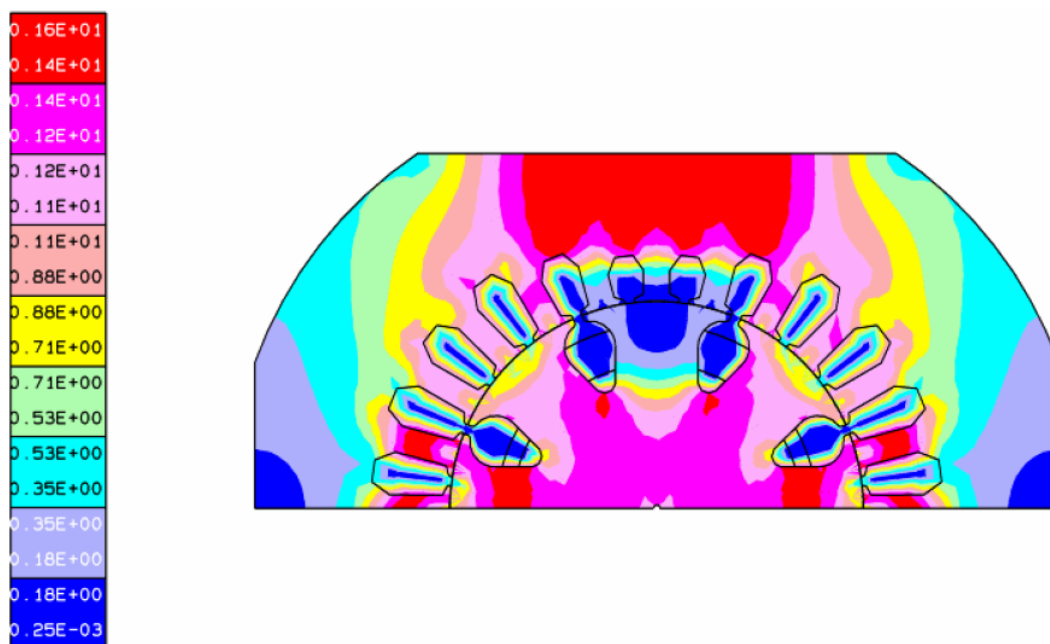


Figura 5.18 – Projeto Final.

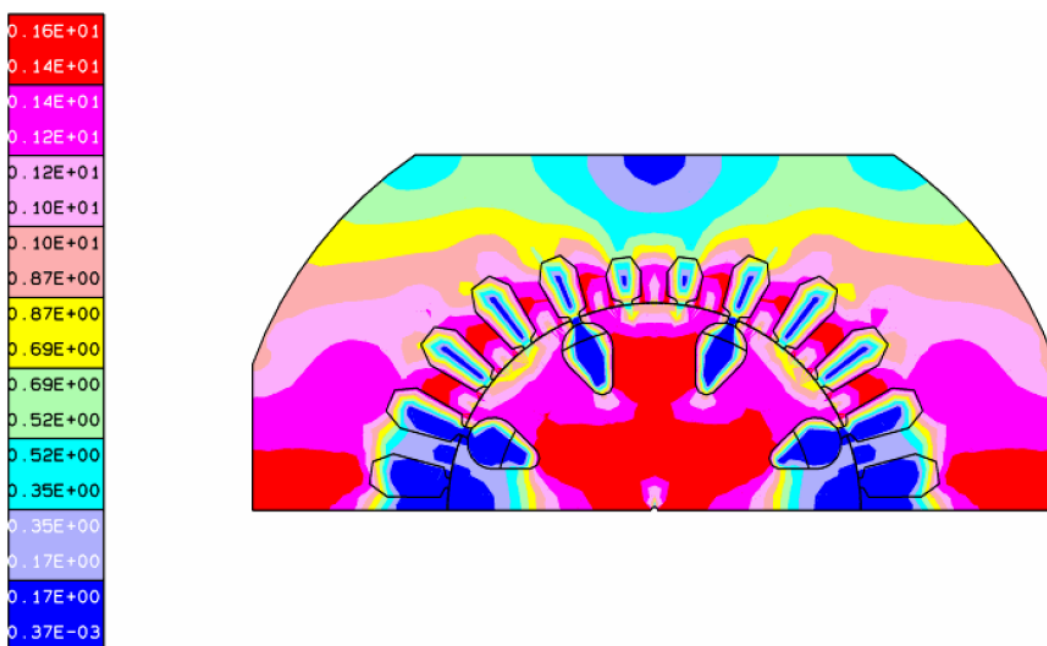
5.7.1 Simulação

Na simulação do projeto final (figuras 5.19 e 5.20) foi utilizada uma densidade de corrente de 1 A/mm^2 . Pela análise das simulações realizadas no projeto final observa-se que os valores de indução nos dentes e na coroa do estator estão adequados. Além disso, no núcleo do novo dispositivo somente alguns pontos apresentaram valor de indução próximo à saturação do material. Percebe-se, também, que os níveis de indução no núcleo foram maiores quando a fase 2 está alimentada. Isso pode ser contornado aplicando-se uma corrente menor na fase 2 do que na fase 1, visto que a alimentação das fases é independente.

Pode-se perceber, também, que em alguns dentes não houve indício de saturação, porém cabe salientar que quando as duas fontes funcionarem ao mesmo tempo, irá ocorrer um fluxo magnético maior nestes dentes, o que não fica evidenciado nesta simulação, fazendo-os atingirem os níveis de indução necessários.

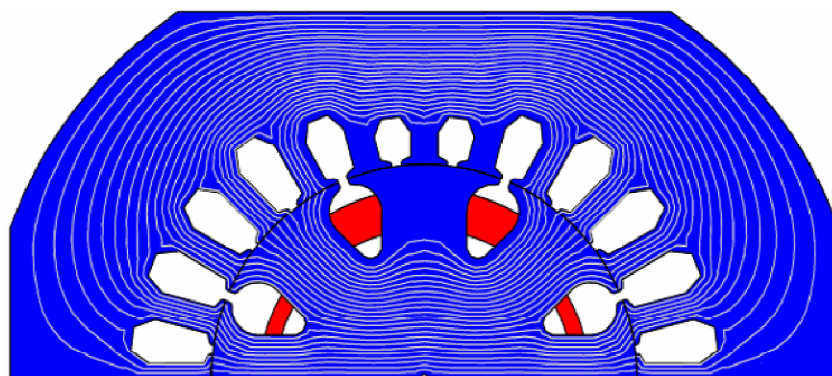


a) Carta de indução com excitação na fase 1.

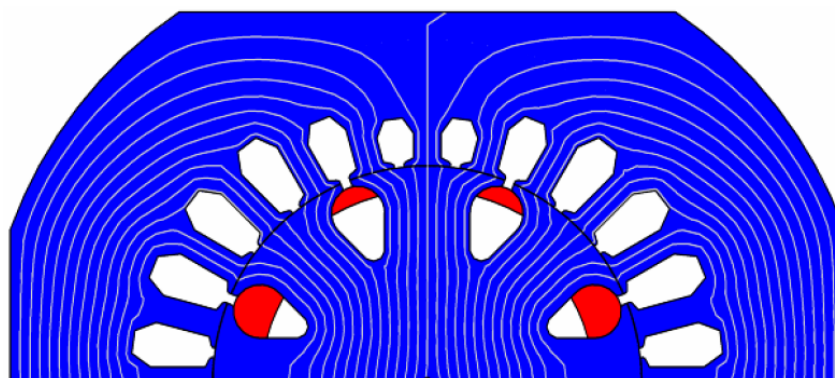


b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.19 – Cartas de indução do projeto final, valores em Tesla.



a) Fluxo magnético com excitação na fase 1, com bobinas em vermelho.



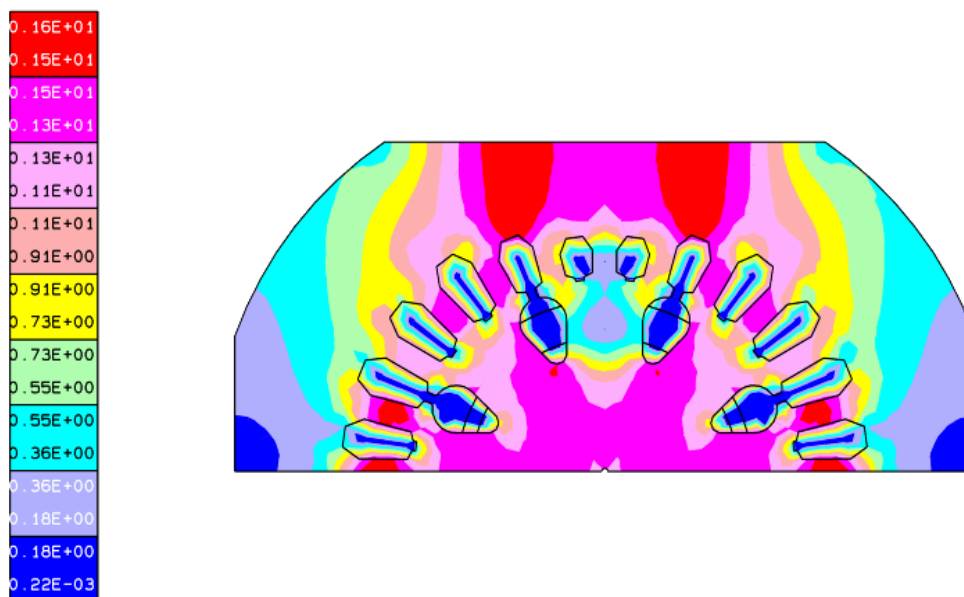
b) Fluxo magnético com excitação na fase 2 com bobinas em vermelho.

Figura 5.20 – Fluxo magnético do projeto final.

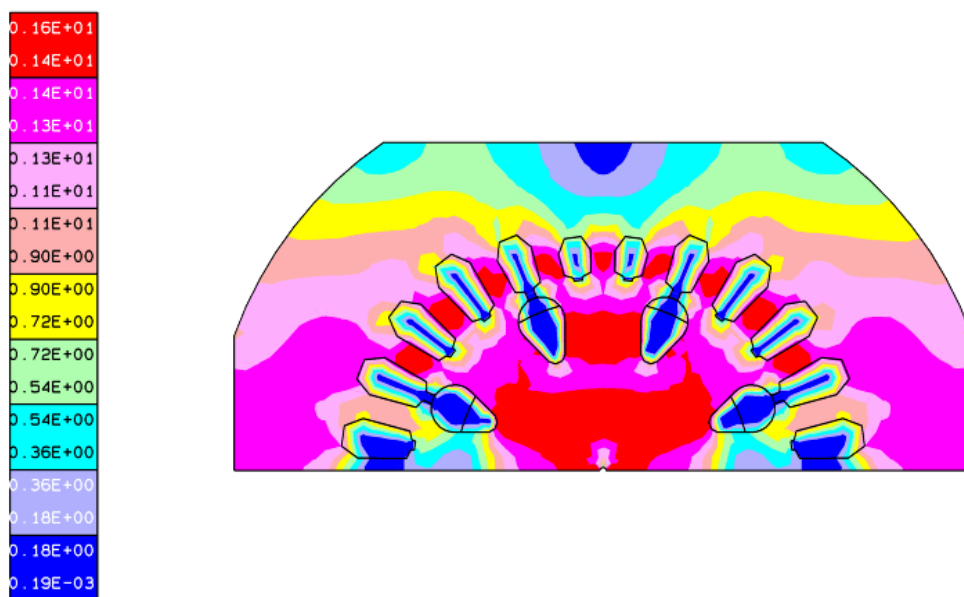
5.7.2 Variação do entreferro

Com o projeto definido foi preciso verificar como o dispositivo atuaria com a variação do entreferro (devido à tolerância da estampagem dos estatores). Para tal, foram simulados casos com entreferro de 0,05 mm, variando-se de 0,05 mm para mais e para menos; ou seja, foram simulados dois casos: com 0,1 mm de entreferro e sem entreferro.

A figura 5.21 apresenta as cartas de indução para o funcionamento do projeto final sem entreferro e com uma densidade de corrente de $0,7 \text{ A/mm}^2$ para ambas as fontes. Pode-se perceber que os dentes, a coroa e o núcleo do dispositivo obtiveram níveis de indução parecidos para uma corrente menor. Logo, os ensaios de estatores com um entreferro menor serão realizados apenas aplicando-se nas bobinas uma corrente menor, que será definida pelo nível de tensão do secundário, que é a imagem da indução no núcleo do dispositivo.



a) Carta de indução com excitação na fase 1.

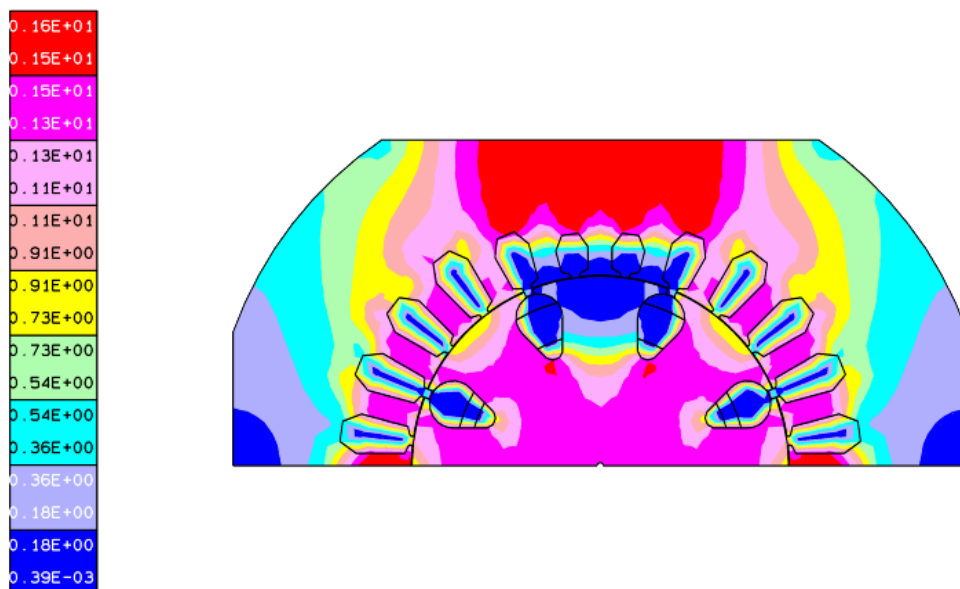


b) Carta de indução com excitação na fase 2.

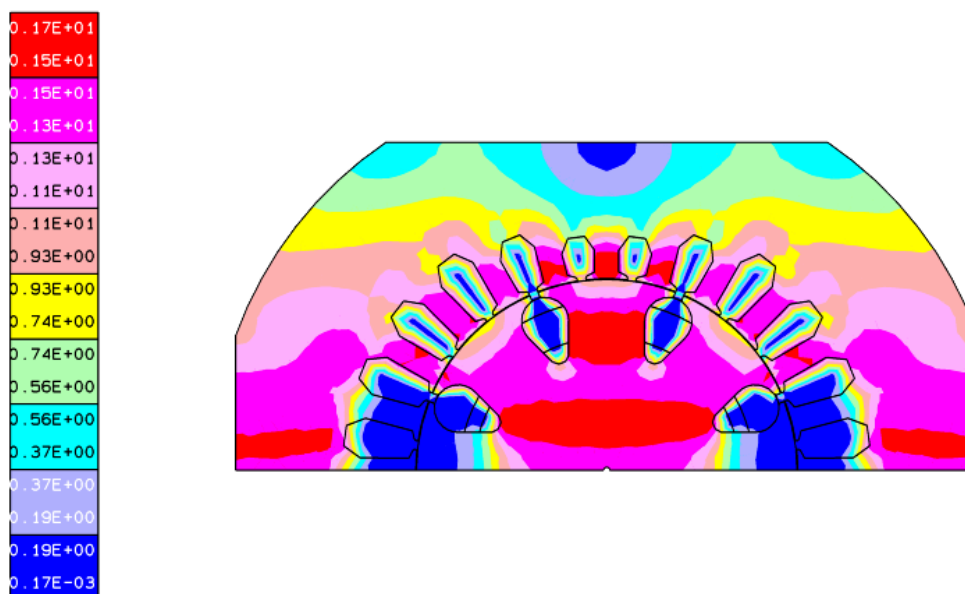
Figura 5.21 – Cartas de indução do projeto final sem entreferro, valores em Tesla.

Vale ressaltar que as cartas de indução para o projeto sem entreferro foram um pouco diferentes às do projeto com entreferro. Isso se deve ao fato de que o circuito magnético muda bastante ao retirarmos o entreferro. Esse tipo de entreferro seria impossível de se obter, visto que para entreferros nulos não seria possível encaixar o estator no dispositivo de testes.

Foi feita também a simulação do projeto final com entreferro de 0,1 mm. Para esta simulação utilizou-se uma corrente maior, ao contrário do que para a simulação sem entreferro, para atingir as especificações necessárias. A seguir se encontram as cartas de indução para uma densidade de corrente de 3 A/mm^2 .



a) Carta de indução com excitação na fase 1.



b) Carta de indução com excitação na fase 2.

Figura 5.22 – Cartas de indução, valores em Tesla, do projeto final com entreferro de 0,1 mm.

Pela análise das cartas de indução das simulações com entreferro de 0,1 mm e sem entreferro pode-se concluir que é possível contornar a variação do entreferro com a variação da corrente aplicada.

5.7.3 Bobinagem

O esquema de bobinagem do projeto final ficou conforme a figura 5.23. Ao se escolher os fios a serem utilizados e os números de espiras, foram feitos cálculos para constatar se a densidade de corrente utilizada na simulação, considerando a ranhura inteira como condutora, não seria muito grande, ao descontarmos as áreas sem cobre nas ranhuras. Estas são: a área de ar que fica entre os fios, a área da isolamento de ranhura (capa que isola o aço dos fios) e a área dos isolantes dos fios.

Outro cálculo que teve de ser feito foi para averiguar se o número de enrolamentos calculados caberia na ranhura. Ele foi efetuado seguindo-se metodologias aplicadas em máquinas elétricas [12]. Neste cálculo os fios condutores são considerados como quadrados de lados iguais ao diâmetro do fio. Em seguida a área efetiva das ranhuras (descontando a área da isolamento da ranhura) é dividida pela área do quadrado, para se encontrar o número de espiras que caberiam na ranhura. Por fim, é constatado se o número de espiras calculado no projeto do dispositivo é menor do que o resultado da divisão.

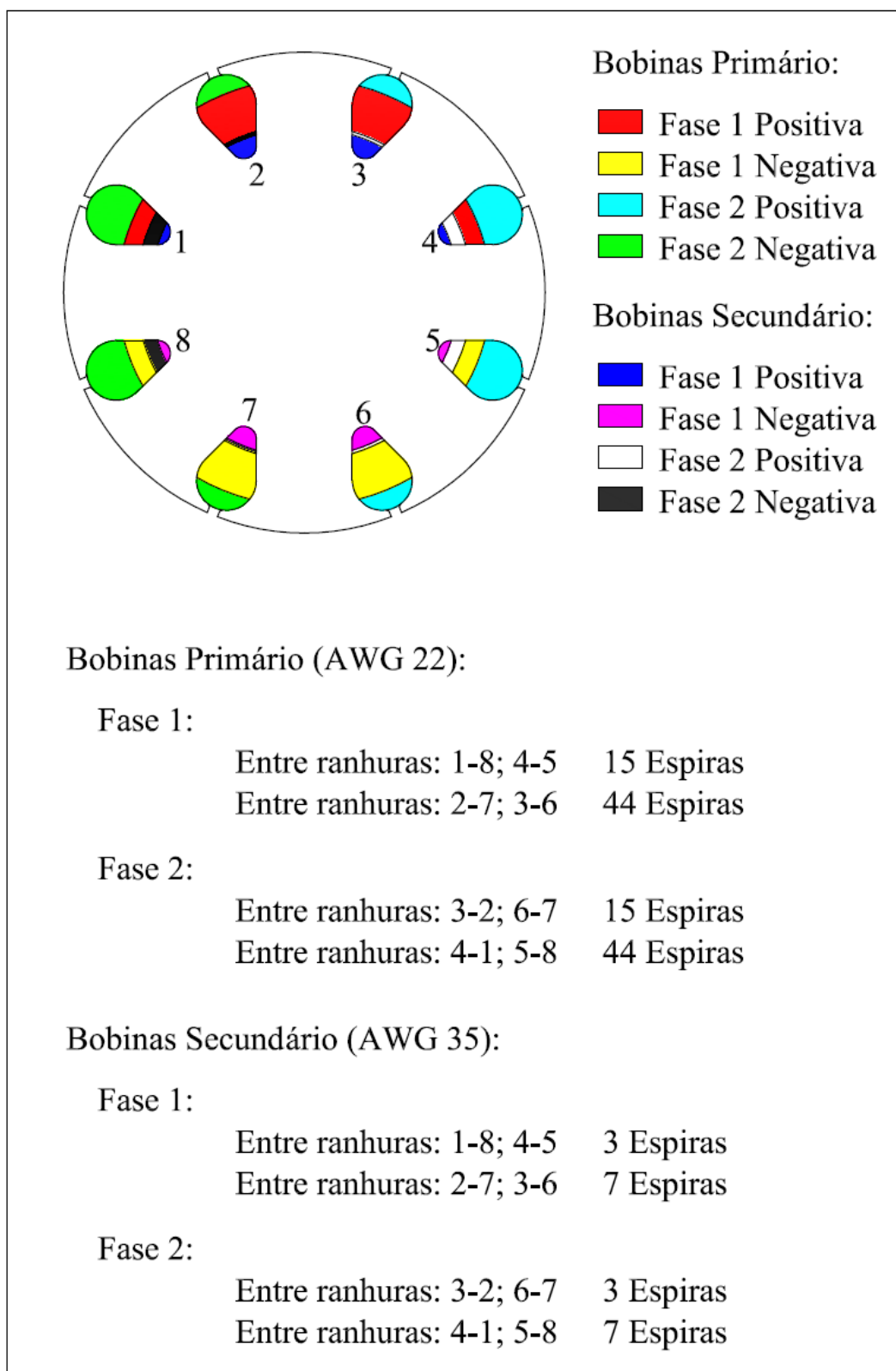


Figura 5.23 – Bobinagem do projeto final.

6. Ensaio do Protótipo

Após os cálculos e dimensionamentos foi confeccionado o protótipo do projeto final. Para validar seu funcionamento foram feitos vários ensaios, similar aos realizados para o testador de núcleo. Nestes ensaios foi utilizada a bancada desenvolvida por SILVA [4], da qual foram usadas as duas fontes de excitação, já que era necessário aplicar um campo girante.



a) Protótipo com o estator.



b) Detalhe do núcleo do protótipo.

Figura 6.1 – Protótipo.

Estes testes foram divididos, novamente, em três etapas: um ensaio de elevação de tensão, um ensaio do valor de indução magnética na coroa do estator e um ensaio da do valor de indução magnética nos dentes do estator. Para a medida da indução magnética foi necessário utilizar sensores de indução, como no ensaio do testador de núcleo. Em todos os testes foram empregadas lâminas de estator do mesmo lote, com as mesmas características magnéticas e dimensões. Estas lâminas foram as mesmas utilizadas nos ensaios do testador de núcleo.

A figura 6.2 propicia uma melhor compreensão dos ensaios realizados. O caso no qual a fase 1 é excitada será chamado de excitação no eixo “x”, visto que o fluxo percorre o direção em “x” no dispositivo. E o caso no qual a fase 2 é excitada será chamado de excitação no eixo “y”. A excitação em “x” é ilustrada na parte “a” da figura 6.2 e na parte

“b” é ilustrada a excitação em “y”, sendo que a área vermelha representa as bobinas que estão sendo excitadas.

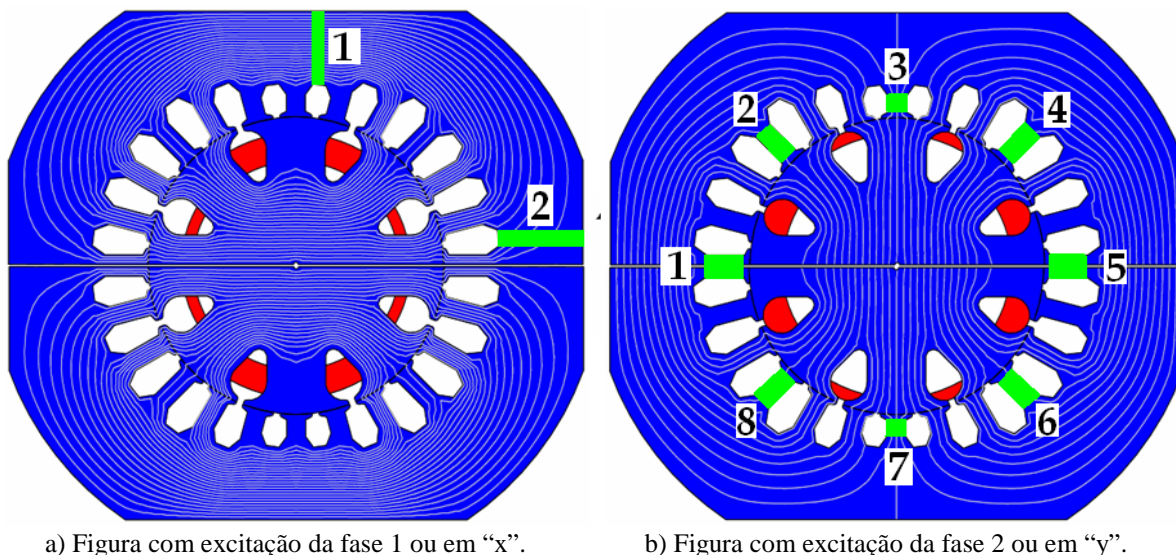


Figura 6.2 – Simulações.

Na parte “a”, também estão ilustradas em verde as posições dos sensores de indução do ensaio do valor de indução magnética na coroa do estator, bem como seus rótulos. Na parte “b” estão ilustradas em verde as posições dos sensores de indução do ensaio do valor de indução magnética nos dentes do estator, bem como seus rótulos.

6.1 Ensaio de elevação de tensão

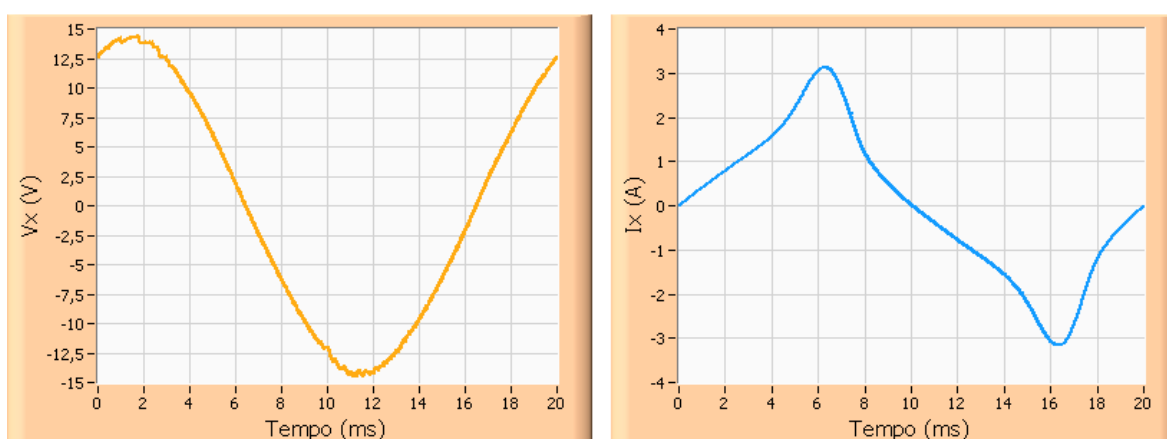
O ensaio de elevação de tensão do protótipo foi baseado no teste que é realizado na Embraco, porém foram utilizadas duas fontes de excitação e duas bobinas para adquirir o valor da tensão no secundário. Variou-se a tensão de pico do secundário de 1 a 11 V, com passos de 1 V, e de 12 a 13,5 V, com passos de 0,5 V. Em cada passo foram adquiridas as tensões em “x” e em “y” do secundário e as correntes em “x” e em “y” do primário. Com estes dados foram desenhados: um laço representando a integral da tensão do secundário em função da corrente do primário para os dois eixos, a área formada por estes laços, um laço da integral da tensão do secundário em “x” em função da integral da tensão do secundário em “y”, e o laço da corrente em “x” em função da corrente em “y”. Todos os pontos de todos os passos foram salvos em arquivos do tipo texto. Após todos os

passos foi desenhada a curva de tensão eficaz do secundário versus corrente eficaz do primário.

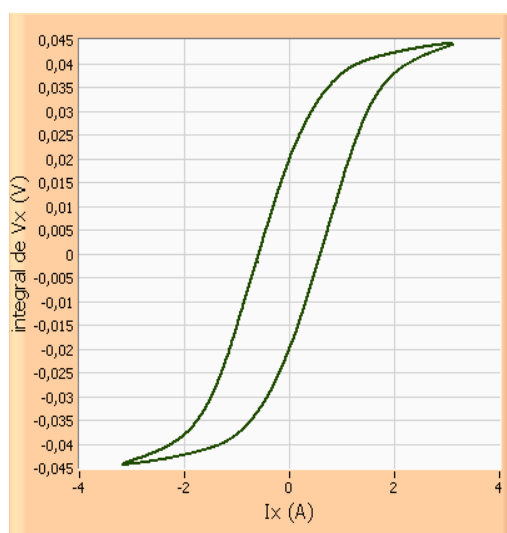
Para comparar os resultados práticos com as simulações realizadas, uma vez que estas ocorreram para o protótipo funcionando somente com uma das duas excitações, foram feitas três medidas diferentes: uma com somente a excitação em “x” funcionando, outra somente em “y” e outra com a excitação em “x” e “y”.

6.1.1 Excitação em “x”

A seguir se encontram os resultados do teste realizado somente com a excitação em “x”.



a) Tensão no secundário e corrente no primário.



b) Laço da integral da tensão do secundário em função da corrente do primário.

Figura 6.3 – Curvas do ensaio de elevação de tensão a 13,5 V no secundário, com apenas a excitação em “x” aplicada.

As curvas apresentadas na figura 6.3 são do passo em que a tensão do secundário valia 13,5 V, já que o gráfico da elevação da tensão representa todos os passos.

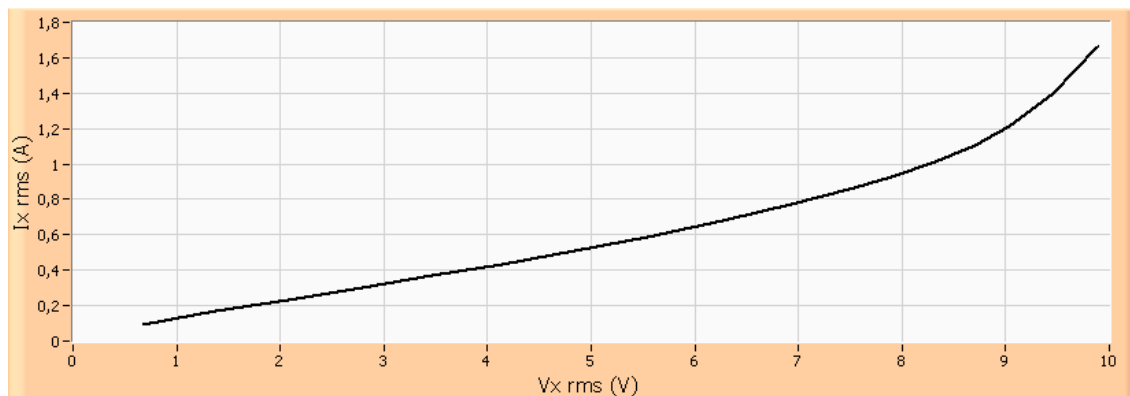


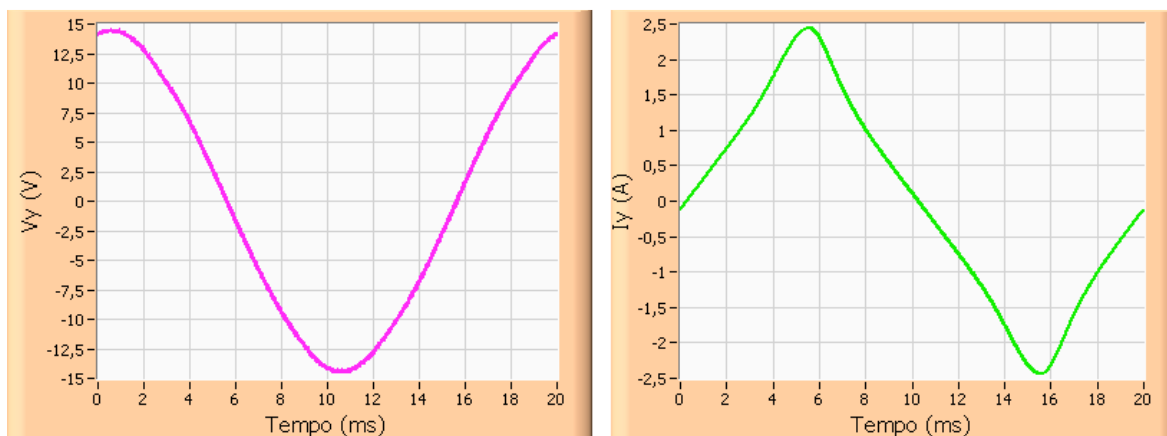
Figura 6.4 – Ensaio de elevação de tensão com apenas a excitação em “x” aplicada: curva da corrente eficaz no primário em função da tensão eficaz do secundário.

6.1.2 Excitação em “y”

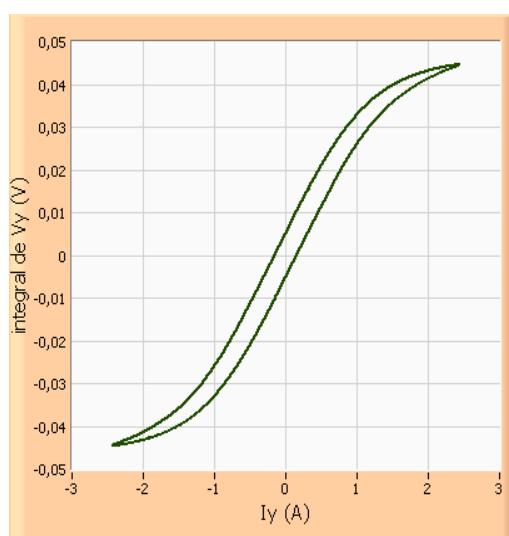
Da mesma forma, nas figuras 5.6 e 5.7 são apresentados os resultados referentes ao ensaio de elevação de tensão com excitação somente em “y”. Como no teste anterior, o passo escolhido para ser apresentado será aquele no qual o valor da tensão do secundário no eixo “y” é igual a 13,5 V.

A diferença observada quando se aplica a excitação somente em “x” e somente em “y” pode ser explicada pela ausência de simetria radial do estator. Pelos resultados é possível observar que, para um mesmo valor de indução no núcleo, representado pelo valor da tensão do secundário, precisa-se aplicar um valor de corrente maior para excitação em “x” do que em “y”. Isso já foi notado anteriormente nas simulações, onde para um mesmo valor de corrente obteve-se um valor maior de indução na excitação em “y” do que em “x”. Além de o valor da corrente ser maior na excitação em “x” para uma mesma indução, o valor das perdas também foi maior. Isto pode ser observado na variação de área formada pelo laço representando a integral da tensão do secundário em função da corrente do primário.

Outro dado importante é que a curva de corrente eficaz em função da tensão eficaz com excitação somente em “x” teve um aumento de inclinação maior do que a curva com excitação em “y”. Esta inclinação caracteriza a saturação do ferro do estator e do núcleo do dispositivo, logo um maior aumento da inclinação significa uma saturação mais acentuada.



a) Tensão no secundário e corrente no primário.



b) Laço da integral da tensão do secundário em função da corrente do primário.

Figura 6.5 – Curvas do ensaio de elevação de tensão a 13,5 V no secundário, com apenas a excitação em “y” aplicada.

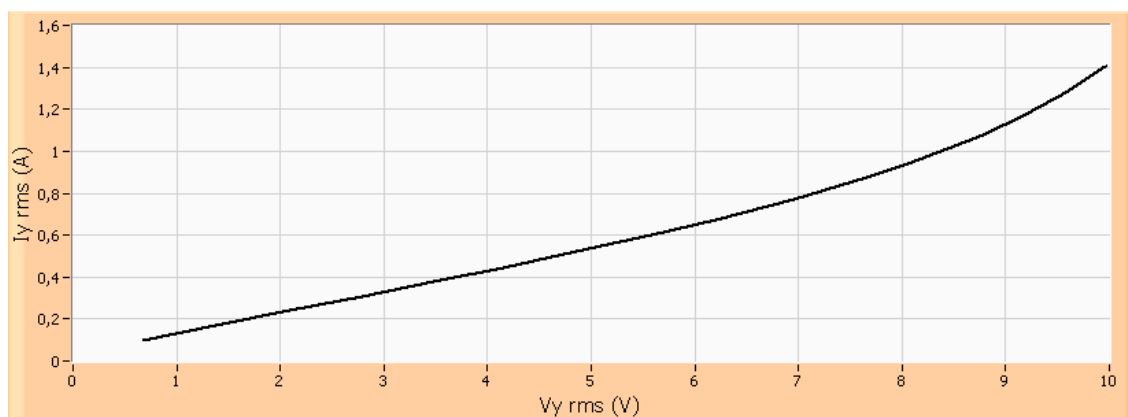


Figura 6.6 – Ensaio de elevação de tensão com apenas a excitação em “y” aplicada: curva da corrente eficaz no primário em função da tensão eficaz do secundário.

6.1.3 Excitação em “x” e em “y”

Neste ensaio variaram-se as tensões dos secundários dos dois eixos de excitação igualmente. Assim as induções obtidas no núcleo do protótipo nas duas direções de magnetização eram praticamente de mesmo valor.

Para os resultados dos testes com excitação das bobinas do eixo “x” e “y” foi possível obter, além das curvas referentes a cada eixo, o laço da integral da tensão do secundário em “x” em função da integral da tensão do secundário em “y”, bem como o laço da corrente em “x” em função da corrente em “y”.

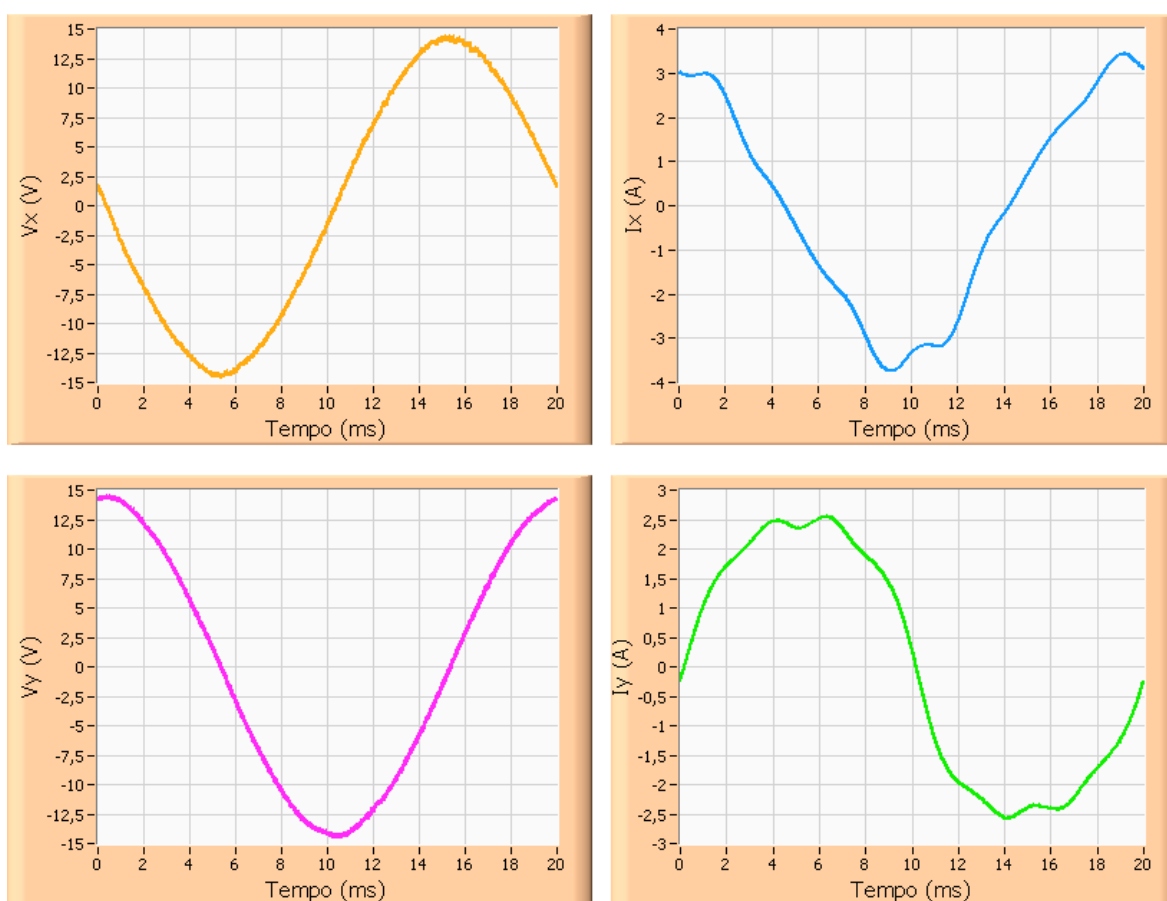


Figura 6.7 – Tensões nos secundários e correntes nos primários do ensaio de elevação de tensão com excitação aplicada em “x” e em “y”

É importante verificar se o laço da integral da tensão do secundário em “x” em função da integral da tensão do secundário em “y” forma um círculo perfeito, pois isso garante que as induções foram controladas devidamente e, assim, a indução foi

perfeitamente rotacional (figura 6.9). Outro dado importante de se verificar é a hipótese de que o laço da corrente em “x” em função da corrente em “y” tem um padrão e que possíveis defeitos que acontecem nas linhas de fabricação do estator podem alterar este padrão de curva (figura 6.10).

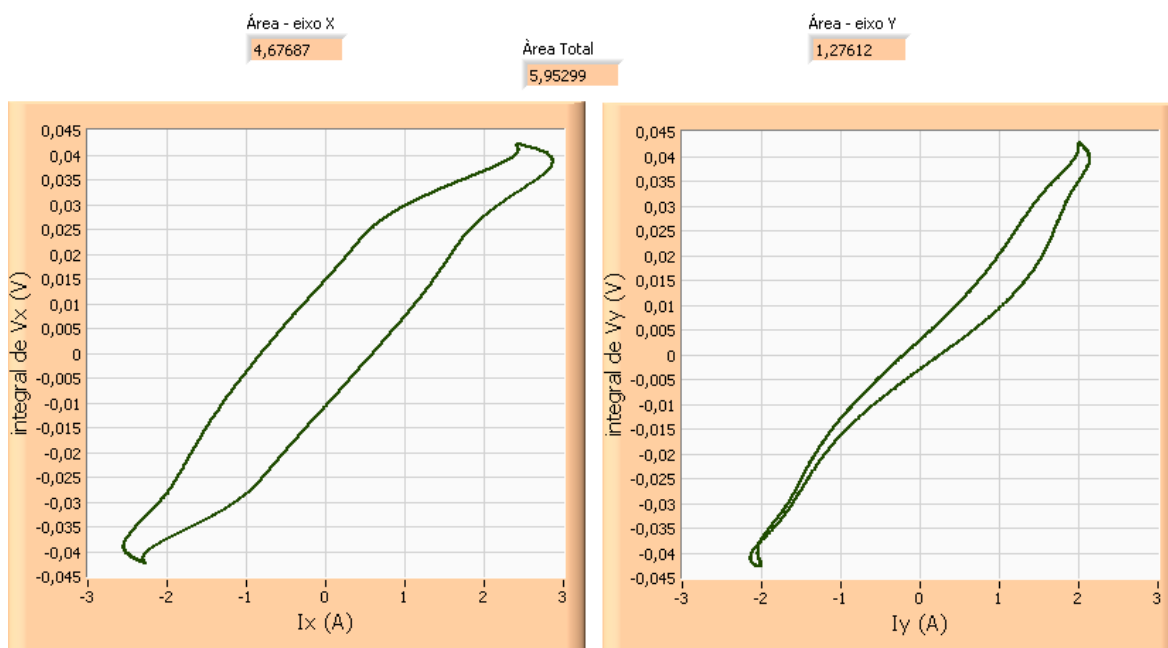


Figura 6.8 – Laços das integrais das tensões dos secundários em função das correntes dos primários do ensaio de elevação de tensão com excitação aplicada em “x” e em “y”.

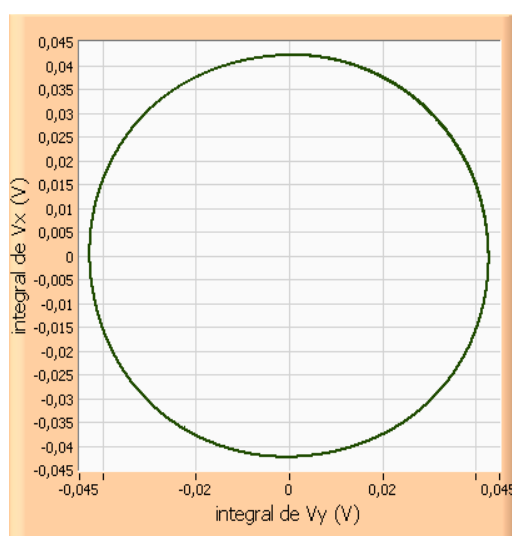


Figura 6.9 – Laço da integral da tensão do secundário em “x” em função da integral da tensão do secundário em “y” do ensaio de elevação de tensão com excitação aplicada em “x” e em “y”.

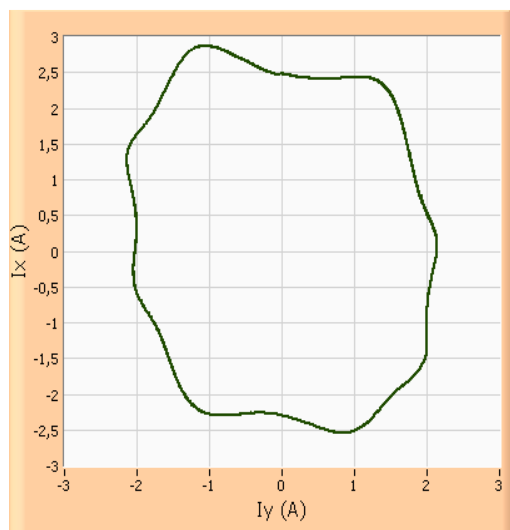


Figura 6.10 – Laço da corrente em “x” em função da corrente em “y” do ensaio de elevação de tensão com excitação aplicada em “x” e em “y”.

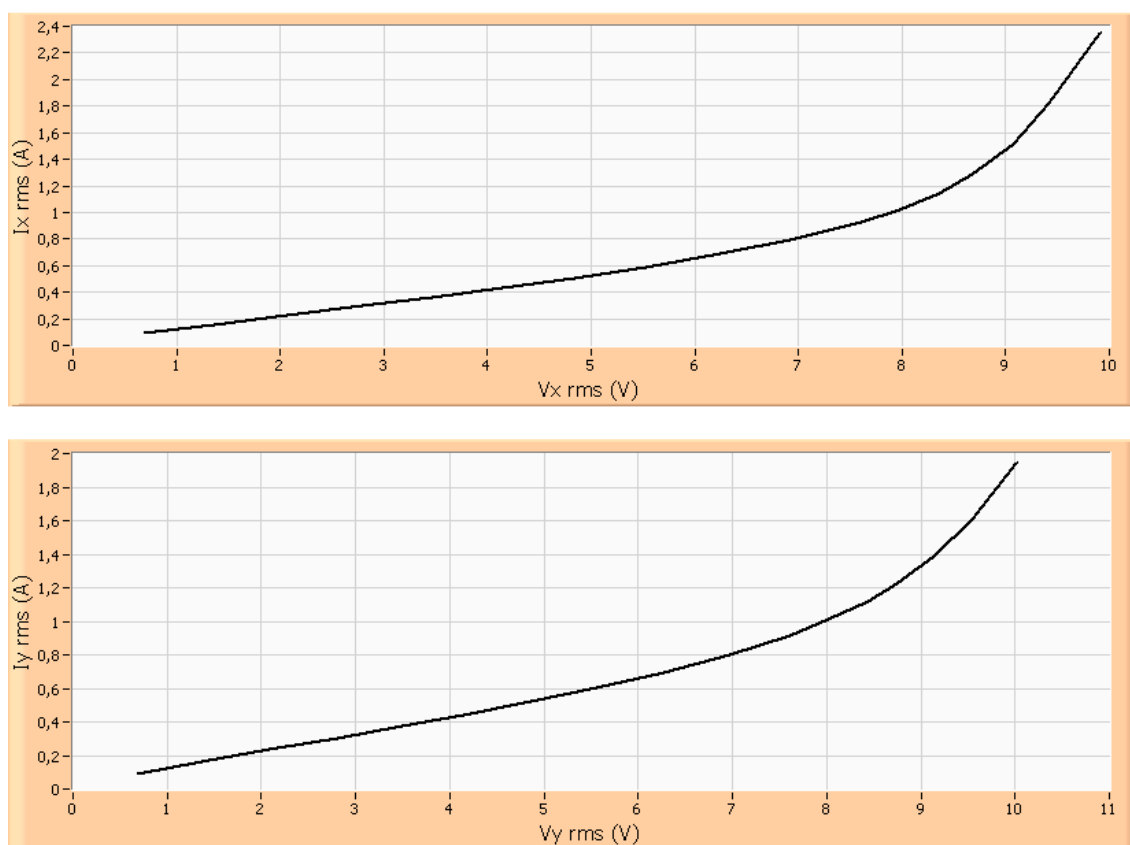


Figura 6.11 – Curvas das correntes eficazes nos primários em função das tensões eficazes dos secundários do ensaio de elevação de tensão com excitação aplicada em “x” e em “y”.

Como nos ensaios de elevação de tensão com excitação somente em “x” e somente em “y”, os gráficos das figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 são referentes ao passo em que as tensões do secundário eram iguais a 13,5 V.

Pela análise dos resultados observa-se que há uma diferença entre os valores das correntes dos dois eixos de magnetização (figura 6.7), visto que o estator não tem uma isotropia geométrica. Além disso, os laços de integral de tensão do secundário em função da corrente do primário se descaracterizaram dos típicos laços BH (figura 6.8). Outra alteração é que ocorreu mais saturação no estator e no núcleo do protótipo do que quando o estator foi excitado com uma única fase, visto que houve um maior aumento na inclinação nos gráficos da corrente eficaz em função da tensão eficaz (figura 6.11).

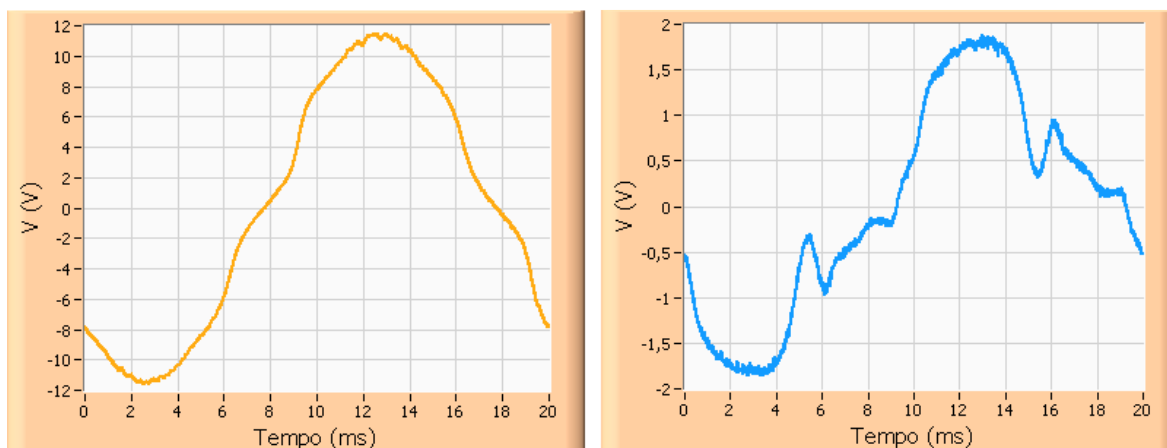
6.2 Ensaio do valor de indução magnética na coroa do estator

O ensaio do valor de indução na coroa do estator foi realizado também em três partes: uma com a excitação somente em “x”, outra somente em “y” e outra com a excitação em “x” e “y”. Para medir as induções foram feitos dois enrolamentos no estator e em duas posições diferentes, conforme mostra a figura 6.2, parte “a”, apresentada anteriormente. Estes enrolamentos são exatamente iguais aos utilizados nos testes do testador de núcleo, bem como suas posições.

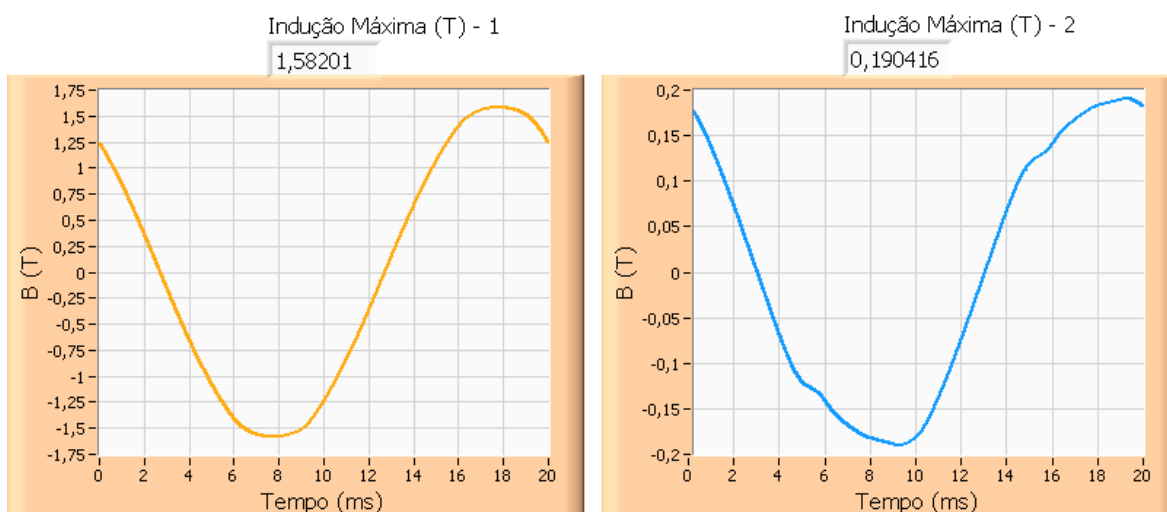
Para o ensaio foi aplicada a maior tensão possível para a bancada utilizada. Em seguida foram feitas as aquisições dos sinais de tensão dos sensores e os respectivos tratamentos para se obter a forma de onda da indução magnética.

6.2.1 Excitação em “x”

A seguir são apresentados os resultados do ensaio do valor de indução da coroa do estator com excitação no eixo “x”.



a) Tensões nos sensores de indução.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores.

Figura 6.12– Ensaio do valor de indução na coroa com excitação do eixo “x”.

Pode-se perceber que a indução máxima da coroa no sensor 1 e no sensor 2 são valores já esperados, segundo a análise da simulação do projeto final, como mostra a tabela a seguir. Isso pode ser explicado, pois boa parte do fluxo resultante da excitação em x da fase 1 atravessa o sensor 1 e somente uma pequena parcela atravessa o sensor 2.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,4 a 1,6	1,58201
2	0 a 0,35	0,19042

Tabela 6.1 – Comparação entre os valores simulados e medidos.

6.2.2 Excitação em “y”

Na excitação somente em “y” ocorre uma inversão dos valores de indução dos sensores em relação à excitação somente em “x”. Isso se deve à mudança do fluxo, que agora percorre o eixo y dentro do núcleo do protótipo.

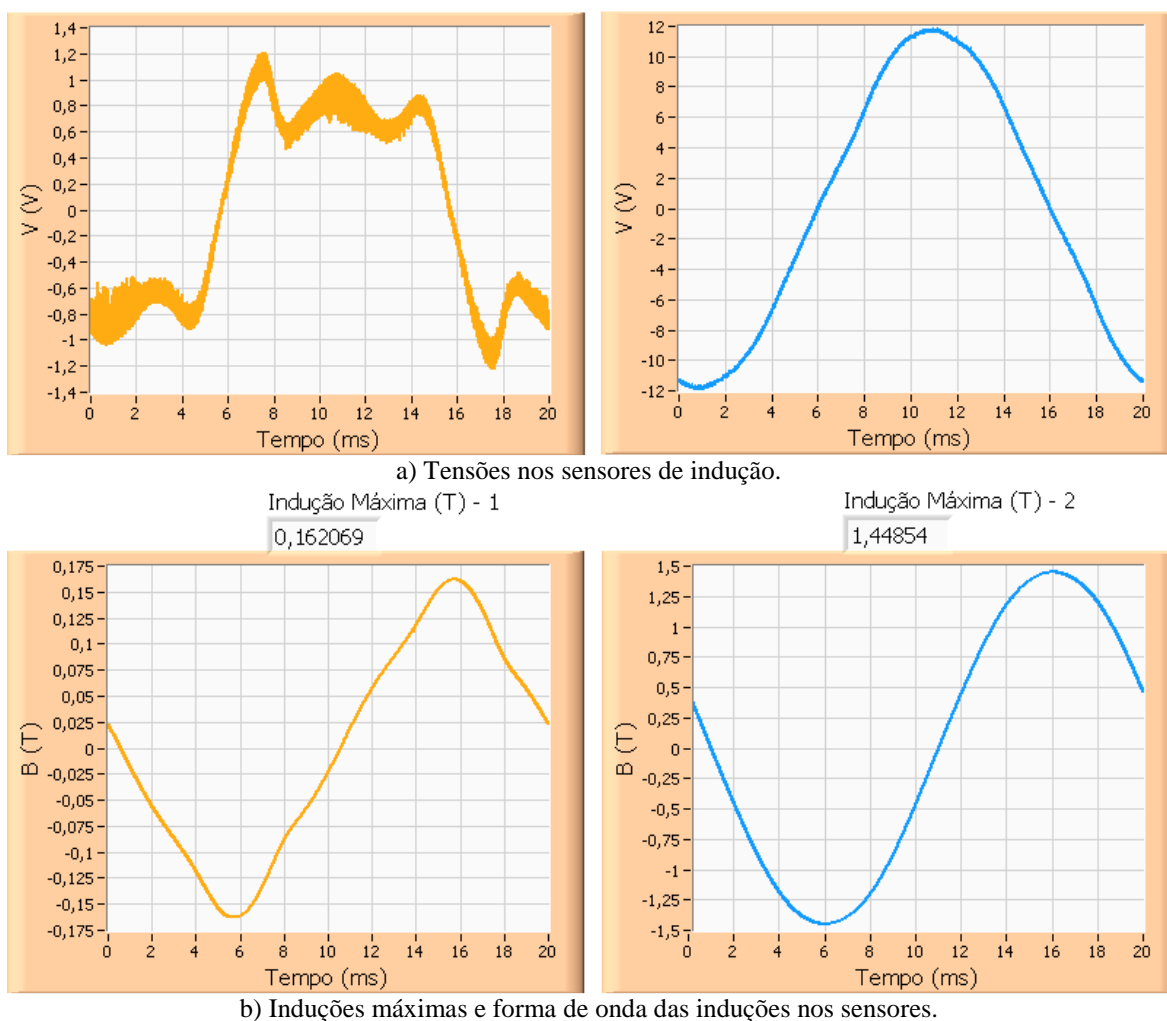


Figura 6.13 – Ensaio do valor de indução na coroa com excitação do eixo “y”.

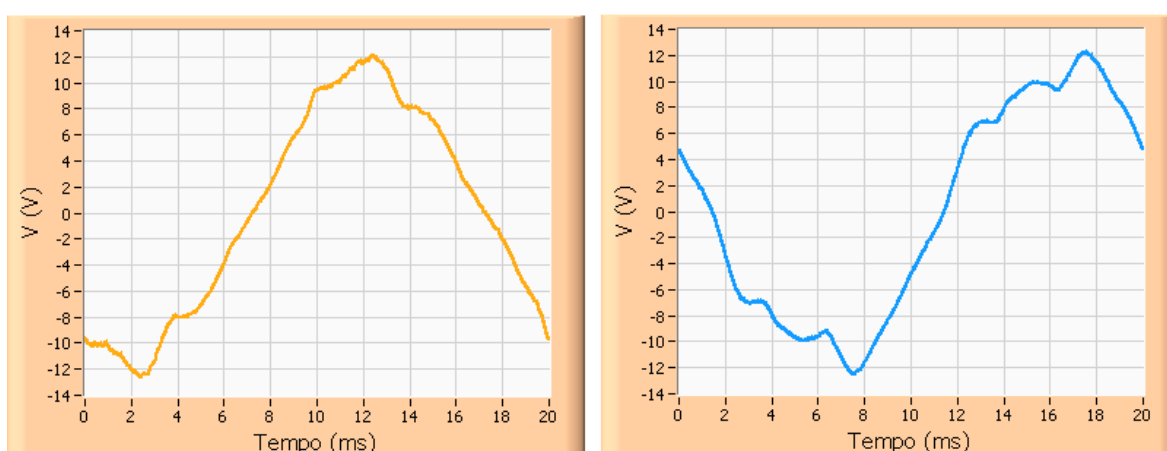
Além disso, os valores máximos de indução medidos ficaram na faixa dos valores simulados, como mostra a tabela a seguir.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	0 a 0,35	0,16207
2	1,4 a 1,6	1,44854

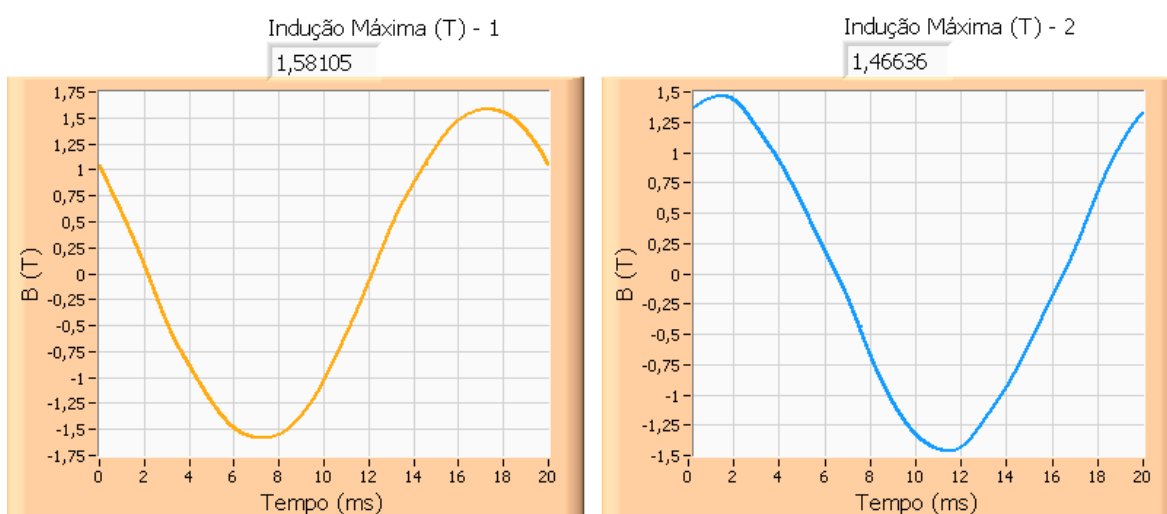
Tabela 6.2 – Comparação entre os valores simulados e medidos.

6.2.3 Excitação em “x” e em “y”

A seguir observam-se os resultados obtidos para a excitação em “x” e em “y” simultaneamente.



a) Tensões nos sensores de indução.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores.

Figura 6.14 – Ensaio do valor de indução na coroa com excitação dos eixos “x” e “y”.

É importante notar que os níveis de indução desejados para a coroa do estator foram atingidos, como mostra a tabela a seguir. Logo o protótipo funcionou bem para este quesito.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,4 a 1,6	1,58105
2	1,4 a 1,6	1,46636

Tabela 6.3 – Comparação entre os valores simulados e medidos.

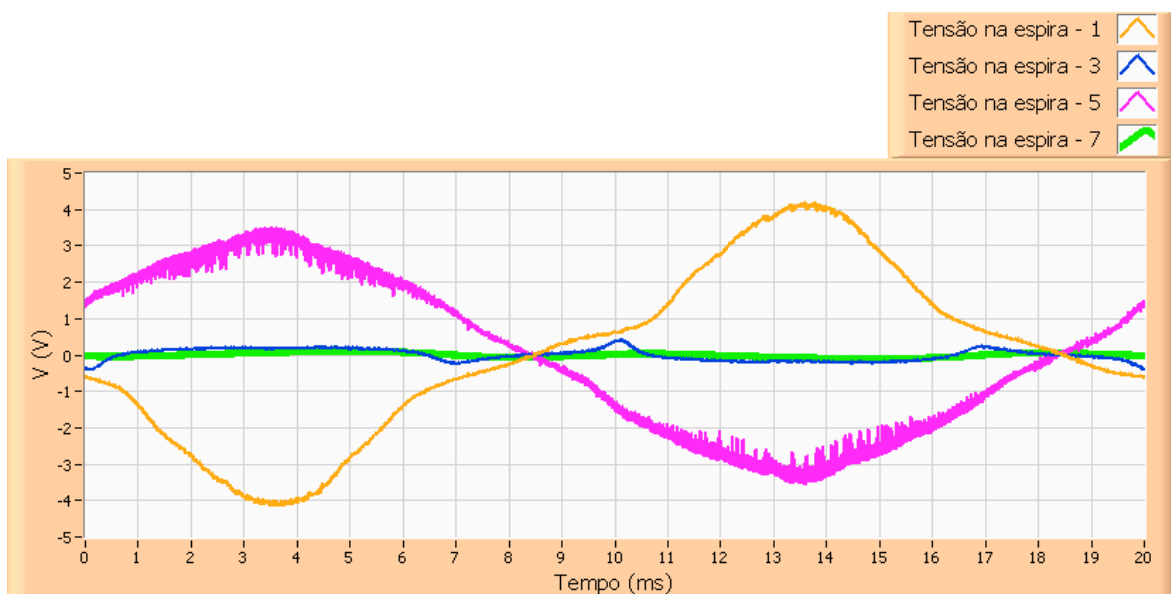
6.3 Ensaio do valor de indução nos dentes do estator

Para o ensaio do valor de indução nos dentes foram feitos oito sensores enrolados nos dentes, distribuídos no estator e numerados conforme a figura 6.2, parte “b”. No ensaio utilizou-se a mesma magnitude de tensão no secundário aplicada no ensaio do valor de indução na coroa do estator. Da mesma forma dos dois outros ensaios, este foi dividido em três partes: uma com a excitação somente em “x”, outra somente em “y” e outra com a excitação em “x” e “y”.

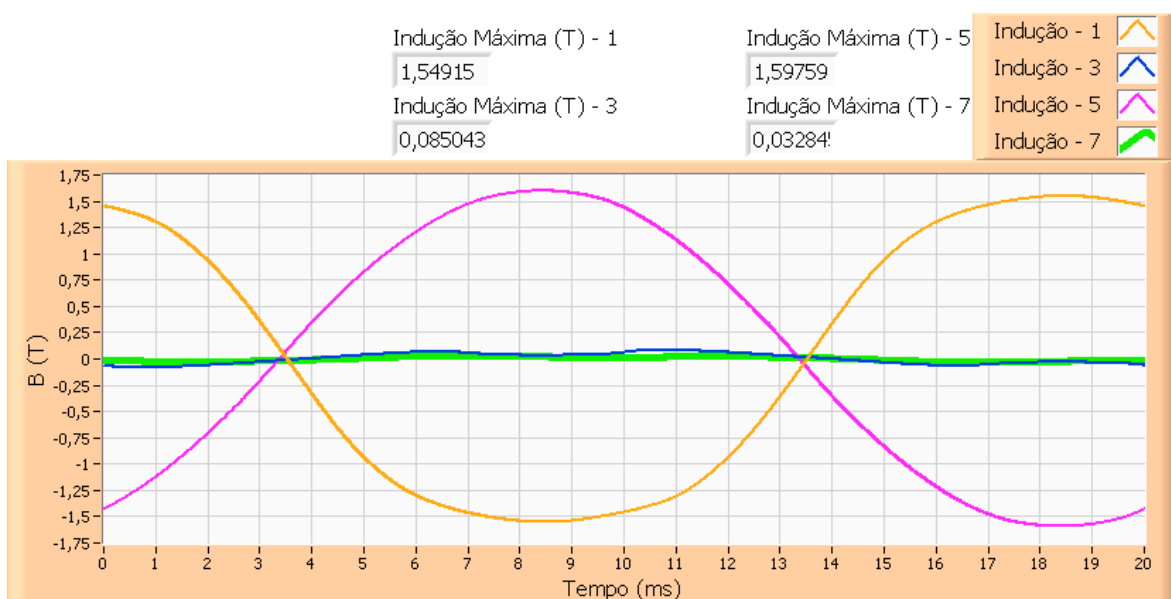
Para a aquisição e tratamento dos sinais utilizou-se o mesmo método do ensaio do valor de indução nas coroas, porém, ao invés de adquirir duas tensões ao mesmo tempo utilizaram-se quatro. Os resultados serão apresentados em duas partes: inicialmente para os dentes 1, 3, 5 e 7 e depois para os dentes 2, 4, 6 e 8.

6.3.1 Excitação em “x”

Nas figuras 6.15 e 6.16 podem-se observar os resultados obtidos do ensaio do valor de indução nos dentes do estator para excitação somente no eixo “x”. Os resultados referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7 são apresentados na figura 6.15 e os referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8 na figura 6.16.

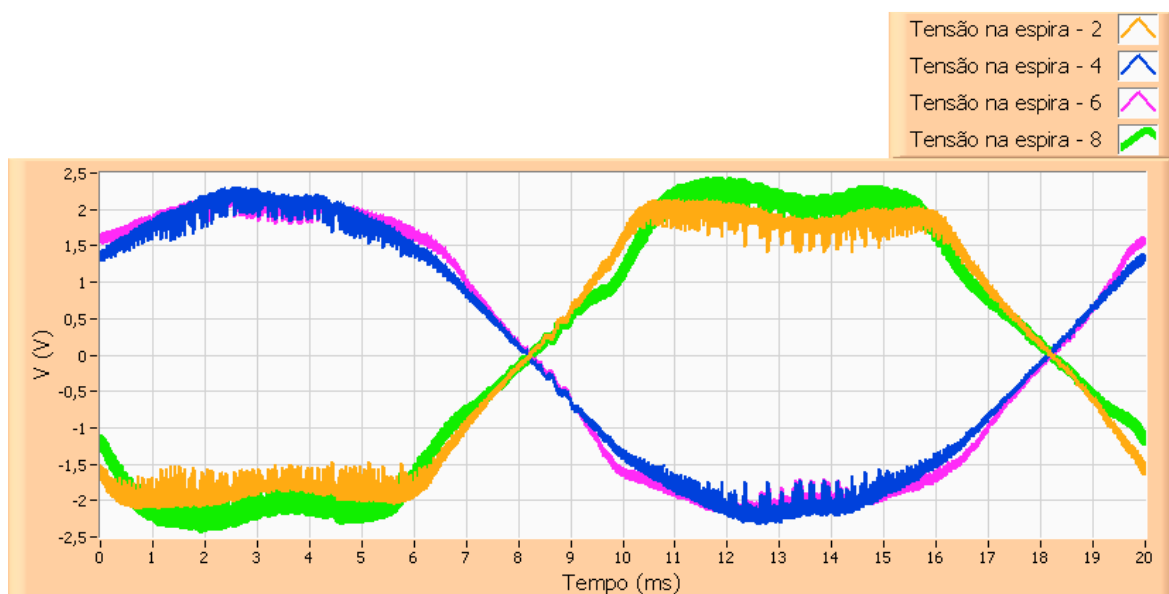


a) Tensões nos sensores de indução 1, 3, 5 e 7.

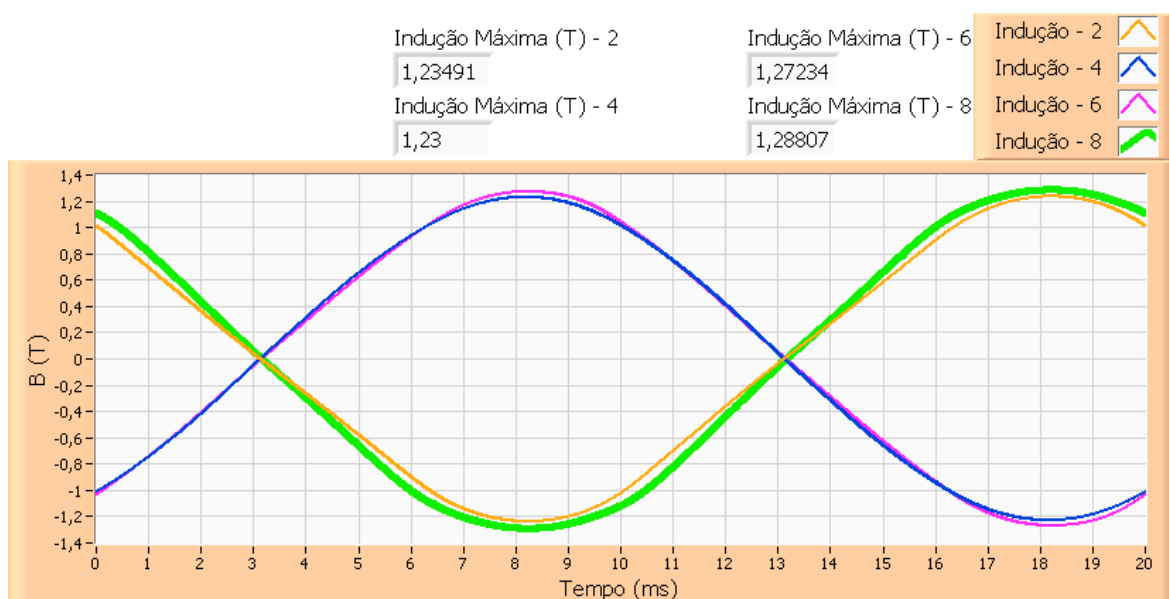


b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 1, 3, 5 e 7.

Figura 6.15 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7 com excitação em “x”.



a) Tensões nos sensores de indução 2, 4, 6 e 8.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 2, 4, 6 e 8.

Figura 6.16 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8 com excitação em "x".

Observa-se que o resultado para este teste é bem parecido ao resultado do ensaio do testador de núcleo, onde a indução nos dentes 3 e 7 é praticamente nula e nos demais ela é bem mais elevada. Os valores máximos de indução dos valores medidos, para os dentes 1, 3, 5 e 7, ficaram dentro da faixa da simulação, como mostra a tabela a seguir.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,4 a 1,6	1,54915
3	0 a 0,18	0,08504
5	1,4 a 1,6	1,59759
7	0 a 0,18	0,03284

Tabela 6.4 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

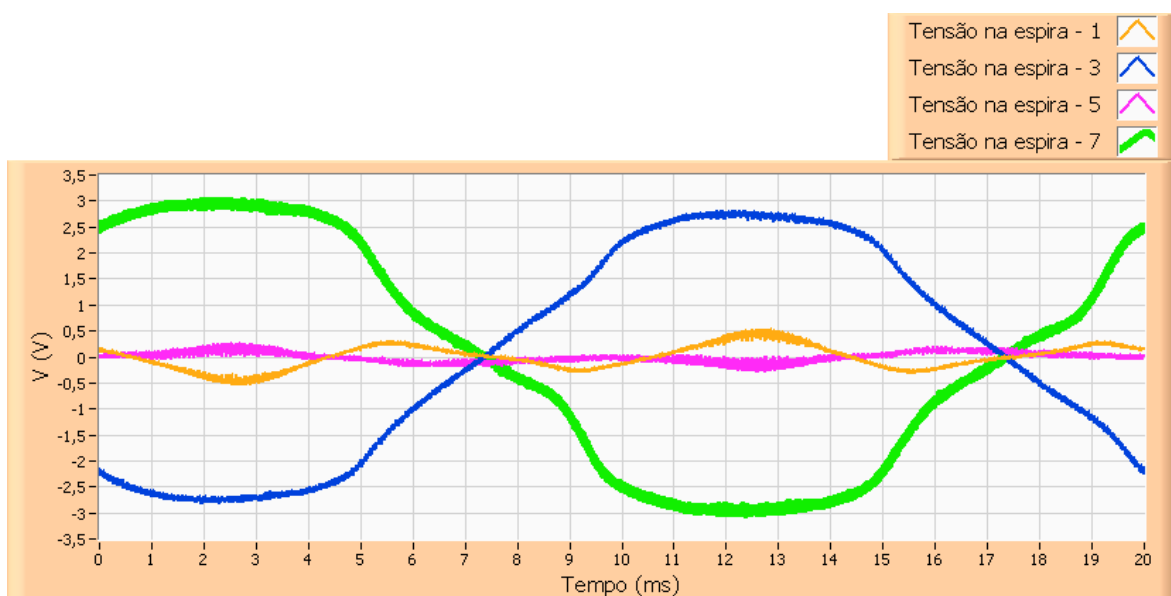
Nos dentes 2, 4, 6 e 8 o valor da indução ficou um pouco abaixo do que a indução nos dentes 1 e 5, uma vez que o fluxo magnético que percorre os dentes 1 e 5 é maior do que o fluxo nos outros dentes. No entanto, os valores de indução destes 4 dentes foram bem próximos aos valores esperados obtidos na simulação, como mostra a tabela a seguir.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
2	1,1 a 1,2	1,23491
4	1,1 a 1,2	1,23000
6	1,1 a 1,2	1,27234
8	1,1 a 1,2	1,28807

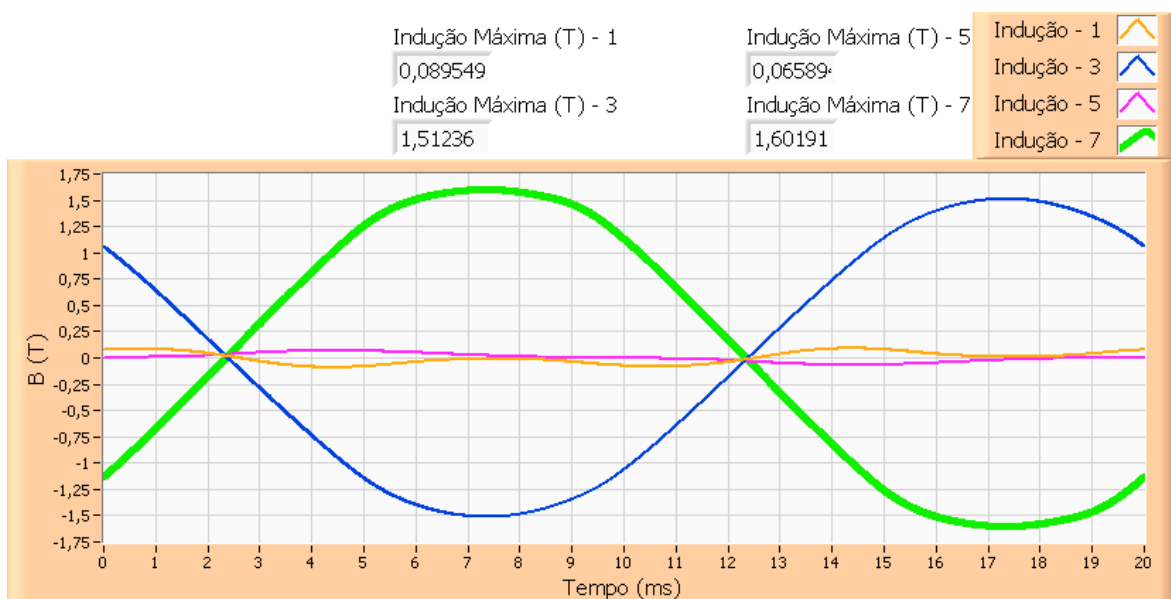
Tabela 6.5 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

6.3.2 Excitação em “y”

Nas figuras 6.17 e 6.18 são apresentados os resultados do ensaio do valor de indução nos dentes para excitação apenas do eixo “y”. Na primeira figura é apresentada os resultados referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7 e na segunda figura os referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8.

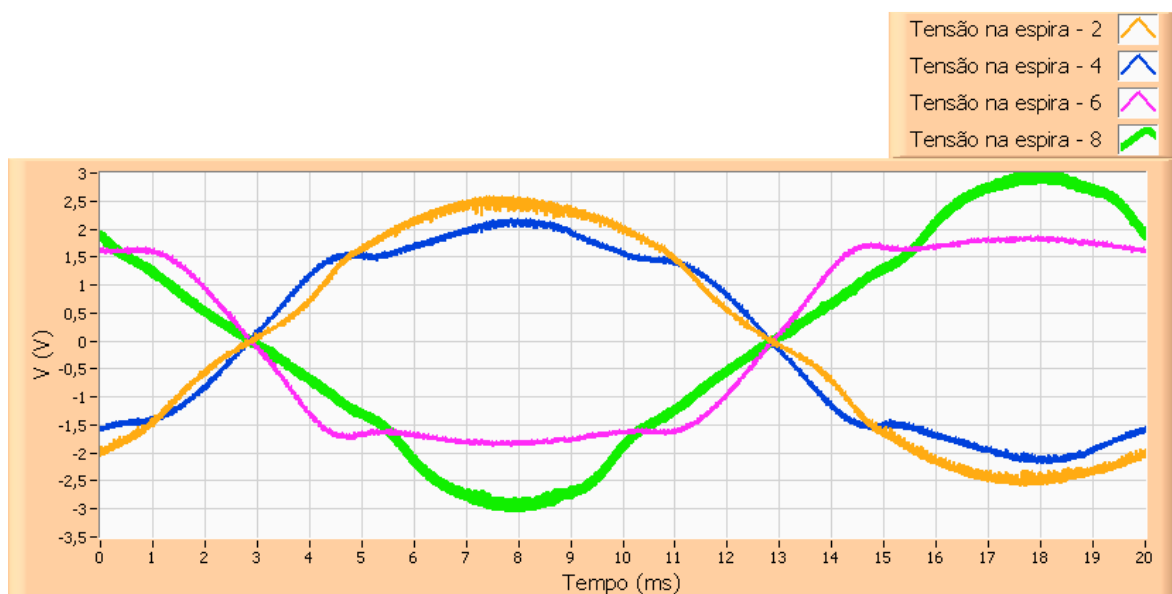


a) Tensões nos sensores de indução 1, 3, 5 e 7.

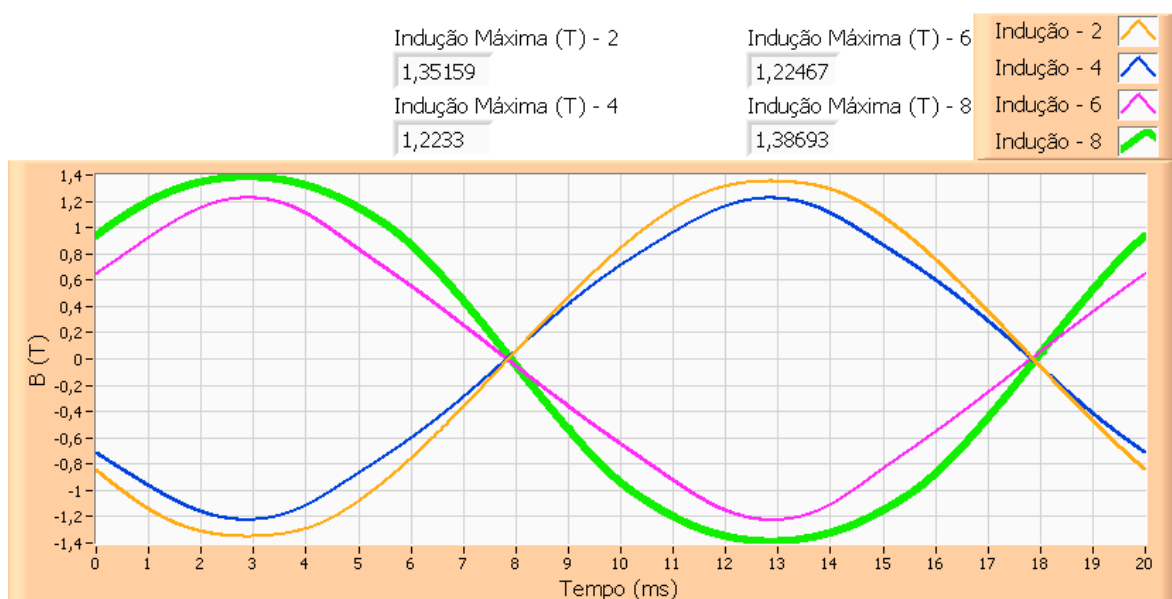


b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 1, 3, 5 e 7.

Figura 6.17 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7 com excitação em “y”.



a) Tensões nos sensores de indução 2, 4, 6 e 8.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 2, 4, 6 e 8.

Figura 6.18 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8 com excitação em “y”.

Pode-se observar que o resultado foi bem parecido para o mesmo ensaio com excitação em “x”. A diferença principal foi que houve alternância dos valores de indução entre os dentes 1 e 5 e os dentes 3 e 7, ou seja, ao invés de os dentes 3 e 7 apresentarem induções praticamente nulas e os dentes 1 e 5 terem induções altas, os dentes 3 e 7 tiveram induções altas e os dentes 1 e 5, praticamente nulas. Isto aconteceu, pois o fluxo que antes era no sentido “x” no núcleo do protótipo passou a ser no sentido “y”.

A tabela a seguir mostra a comparação entre os valores simulados e medidos das induções nos dentes 1, 3, 5 e 7.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	0 a 0,17	0,08954
3	1,4 a 1,6	1,51236
5	0 a 0,17	0,06589
7	1,4 a 1,6	1,60191

Tabela 6.6 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

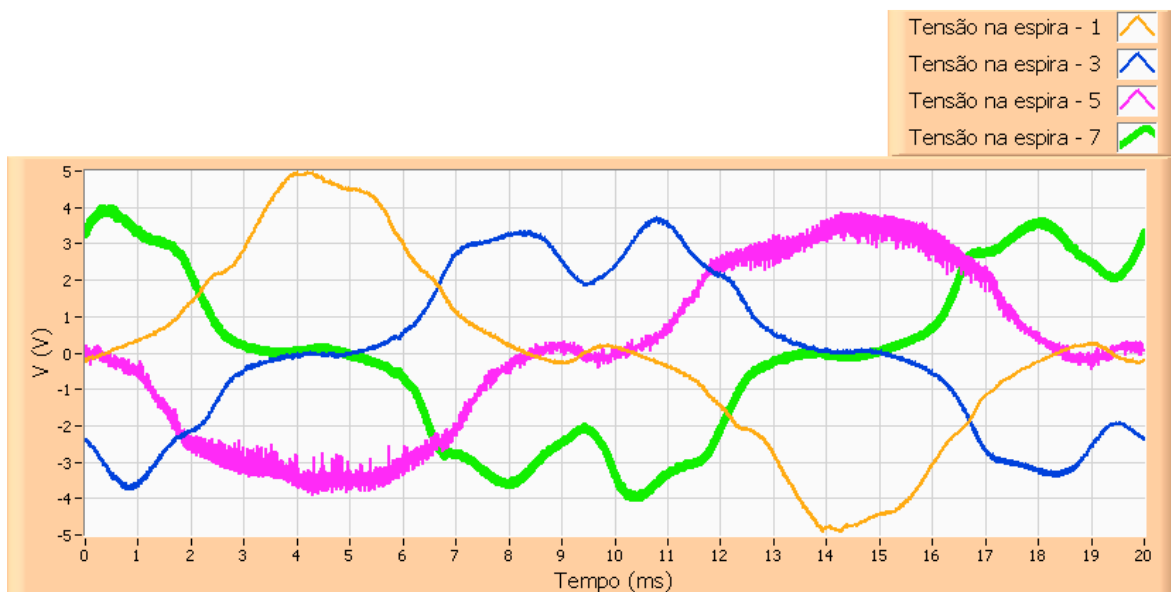
Já para os dentes 2, 4, 6 e 8 os valores máximos de indução da simulação foram um pouco maiores do que os valores medidos, como mostra a tabela 6.7. Essa diferença um pouco maior nos valores de indução ocorre, pois se utilizou para excitar a fase 2 um valor menor de corrente do que para excitar a fase 1 (na simulação foi utilizado o mesmo valor de corrente para as duas fases).

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
2	1,4 a 1,6	1,35159
4	1,4 a 1,6	1,22330
6	1,4 a 1,6	1,22467
8	1,4 a 1,6	1,38693

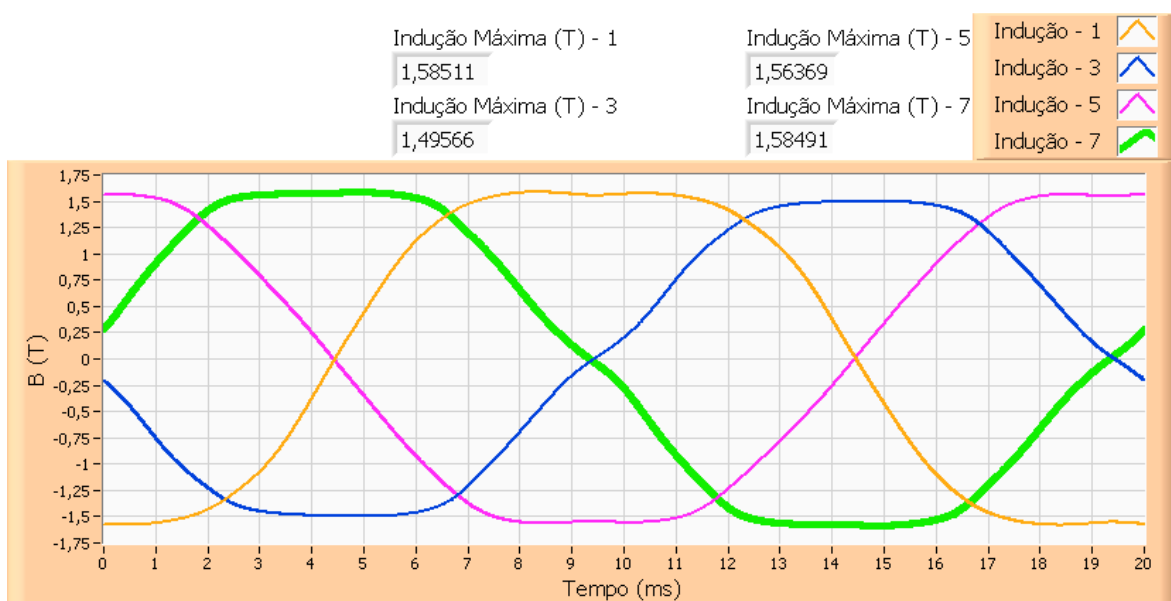
Tabela 6.7 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

6.3.3 Excitação em “x” e em “y”

As figuras 6.19 e 6.20 apresentam os resultados do ensaio do valor de indução nos dentes para excitação dos eixos “x” e “y”, a primeira é referente aos dentes 1, 3, 5 e 7 e a segunda, aos dentes 2, 4, 6 e 8.

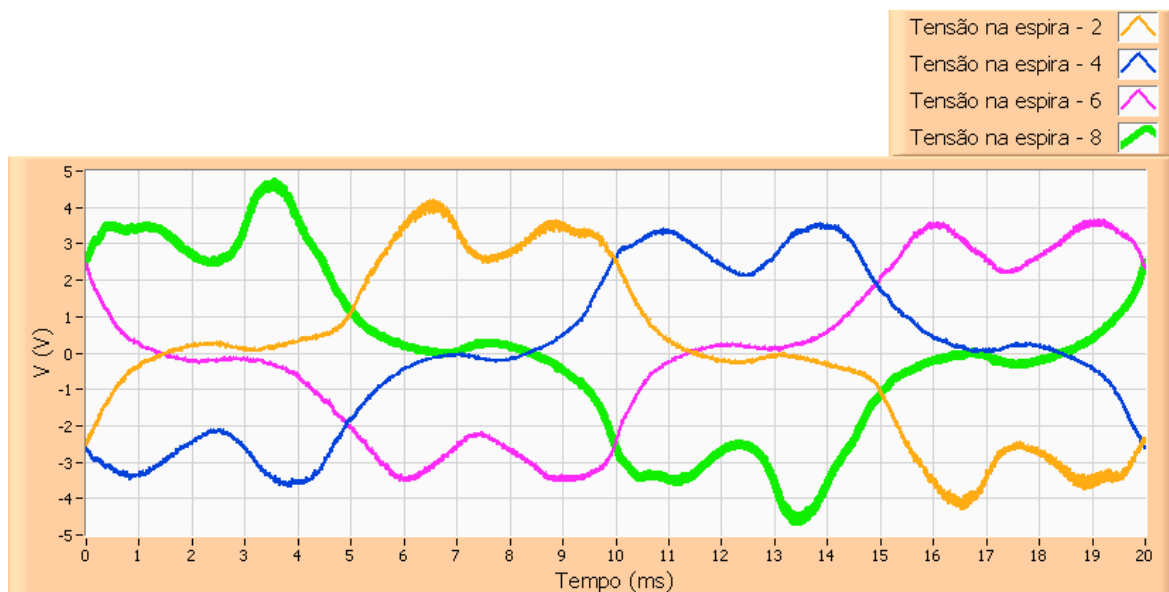


a) Tensões nos sensores de indução 1, 3, 5 e 7.

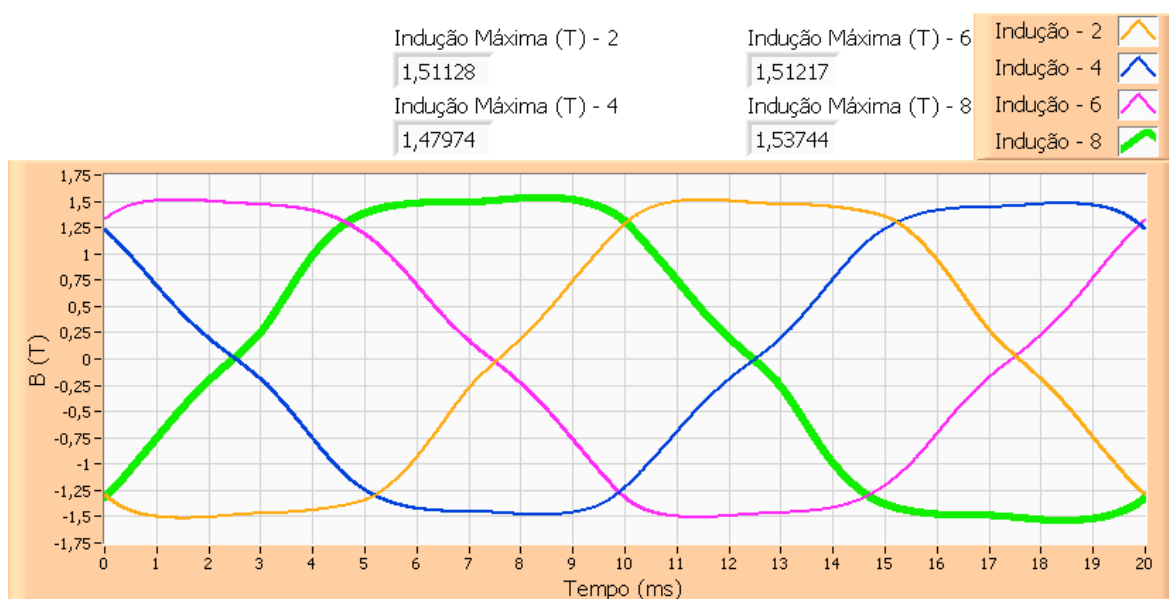


b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 1, 3, 5 e 7.

Figura 6.19 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 1, 3, 5 e 7 com excitação em “x” e em “y”.



a) Tensões nos sensores de indução 2, 4, 6 e 8.



b) Induções máximas e forma de onda das induções nos sensores 2, 4, 6 e 8.

Figura 6.20 – Ensaio do valor de indução nos dentes do estator referentes aos dentes 2, 4, 6 e 8 com excitação em “x” e em “y”.

Excitando as duas bobinas os resultados obtidos foram satisfatórios, todos os dentes obtiveram níveis de indução em torno de 1,5 Tesla. Além disso, é possível perceber que o campo aplicado foi girante, pois a indução máxima em cada dente se alterna seguidamente entre os dentes.

Para os dentes 1, 3, 5 e 7 os valores máximos de indução na simulação foram bem próximos aos valores medidos, como mostra a tabela a seguir.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
1	1,4 a 1,6	1,58511
3	1,4 a 1,6	1,49566
5	1,4 a 1,6	1,56369
7	1,4 a 1,6	1,58491

Tabela 6.8 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

Para os dentes 2, 4, 6 e 8 os níveis de indução não são iguais, pois o estator não tem simetria radial. Além disso, qualquer pequena alteração no entreferro resulta em uma grande alteração nas induções, como foi visto nas simulações. Os valores máximos da indução medida ficaram dentro da faixa de valores simulada.

Sensor	Simulação (Faixa de valores em Tesla)	Medição (Tesla)
2	1,4 a 1,6	1,51128
4	1,4 a 1,6	1,47974
6	1,4 a 1,6	1,51217
8	1,4 a 1,6	1,53744

Tabela 6.9 - Comparação entre os valores simulados e medidos.

7. Conclusões Finais e Perspectivas

7.1 Conclusões finais

O objetivo deste trabalho foi o projeto e a adequação de um dispositivo magnético capaz de aplicar campos rotacionais sobre chapas de estatores. Com o intuito de cumprir este objetivo, foram feitas algumas tarefas: o estudo do dispositivo já utilizado para testes de estatores sobre campos alternantes na Embraco, bem como os testes realizados sobre os estatores; o estudo da bancada confeccionada por SILVA [4] durante sua tese, que aplica campos rotacionais sobre chapas únicas; o projeto do novo dispositivo magnético; a adaptação da bancada e a confecção de programas de aquisição e tratamento de dados; e por fim os testes do novo dispositivo.

O protótipo do dispositivo desenvolvido aplicou campos rotacionais sobre estatores a uma frequência de 50 Hz sendo que as induções foram controladas para serem perfeitamente senoidais. Nestes testes puderam ser aplicados valores de indução de 1,5 Tesla em todos os dentes do estator e valores maiores que 1,3 Tesla na coroa.

É importante ressaltar que para os testes realizados em estatores através deste dispositivo não foi possível quantificar as perdas devido a campos rotacionais. Logo, não foi possível comparar as perdas para testes sob campos alternantes e testes utilizando este dispositivo. Isso se deve ao fato de que para se quantificar as perdas é necessário ter as formas de onda das induções magnéticas e dos campos magnéticos, ondas que por sua vez dependem da seção magnética efetiva e caminho médio magnético, respectivamente, que são variáveis de cálculo difícil, e que para isso não se tem uma metodologia garantida.

Contudo, o objetivo deste trabalho não é quantificar as perdas rotacionais, mas sim avaliar a qualidade dos estatores de motores de indução monofásicos numa linha de produção, comparando-se os resultados obtidos com aqueles provenientes do mesmo ensaio feito em um estator padrão.

Um fator que influenciou no projeto do novo dispositivo foi a variação do entreferro. Na confecção de estatores existe uma variação das dimensões devido ao processo de fabricação. Esta variação altera o entreferro entre o estator testado e o dispositivo, alterando bastante os resultados. Por meio de simulações viu-se que essa

variação do entreferro pode ser compensada aumentando-se o valor das correntes de excitação. Logo, foi necessário dimensionar o novo protótipo considerando o maior valor de entreferro possível.

Além disso, podem ocorrer variações do entreferro em um mesmo estator. Estas variações são de pequena ordem, porém são percebidas nos ensaios no qual se medem as induções nos dentes. Para dentes simétricos os níveis máximos de indução medidos não foram iguais. Viu-se que esta variação não altera a conclusão sobre os resultados obtidos, já que a variação da indução é de pequena ordem.

Nos testes do novo dispositivo se observou que, para um mesmo valor de indução no núcleo, representado pelo valor da tensão do secundário, é necessário aplicar um valor de corrente maior para excitação em “x” do que em “y”. Isso foi notado, também, nas simulações, onde para um mesmo valor de corrente obteve-se um valor maior de indução na excitação em “y” do que em “x”.

Um gráfico importante do ensaio de elevação de tensão é a curva da corrente do eixo “y” em função da corrente do eixo “x”. Através deste gráfico espera-se detectar um padrão de curva para os estatores sadios e para os possíveis defeitos que possam ocorrer na sua fabricação. Logo, se existir um defeito no estator, esse será detectado já na linha de produção. Isto, no entanto deverá ser investigado futuramente e é uma sugestão futura para continuidade dos trabalhos.

Por fim, o dispositivo magnético capaz de aplicar campo girante em estatores tinha como objetivo inicial não só aplicar este campo, mas também ser um equipamento de fácil manuseio e de testes rápidos. Isso porque uma das intenções deste trabalho é utilizar esse método de testes na linha de produção de estatores. Acredita-se que o desenvolvimento deste protótipo atendeu aos requisitos pretendidos anteriormente. Espera-se que este equipamento possa ser utilizado futuramente e que este protótipo sirva de base para o desenvolvimento de outros trabalhos.

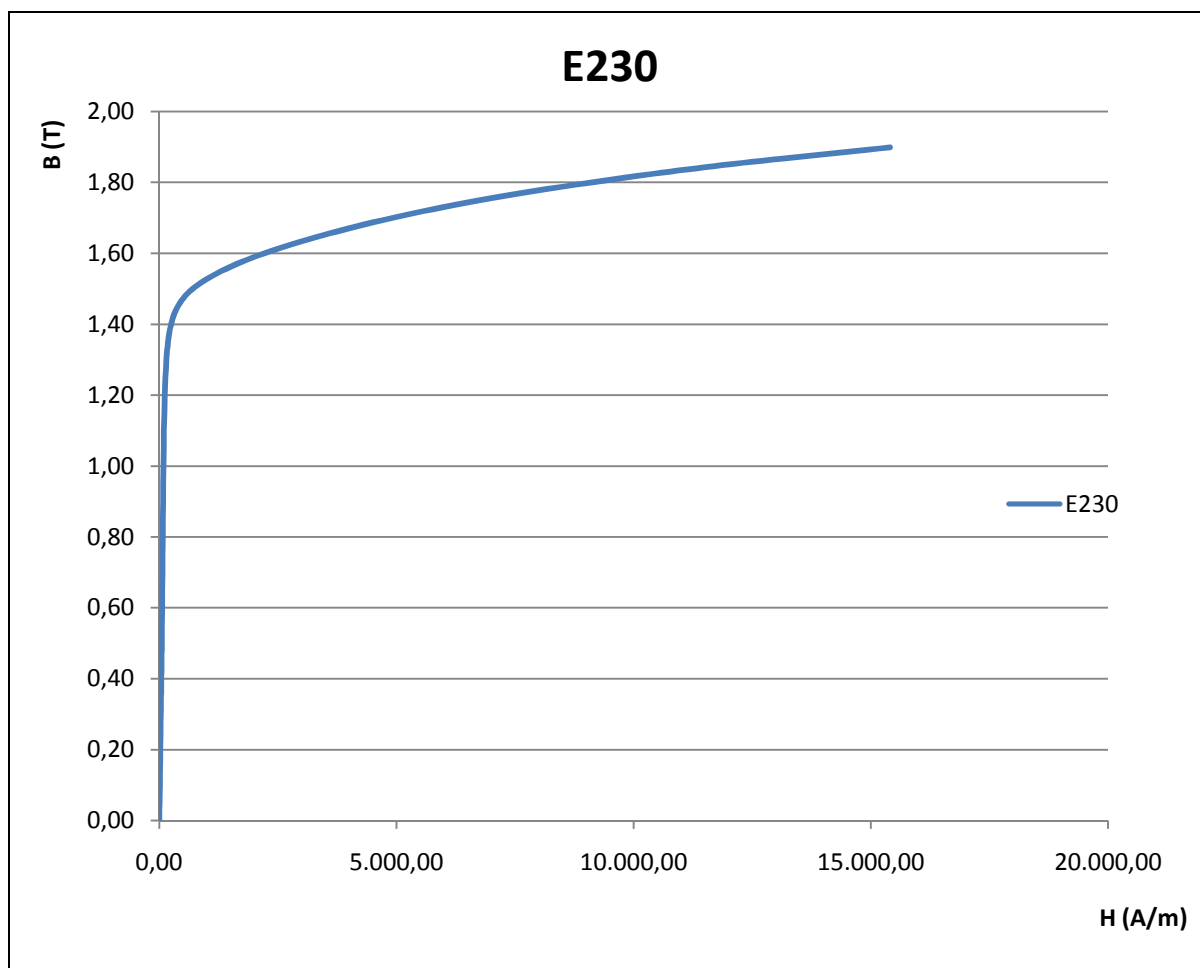
7.2 Perspectivas

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se mencionar:

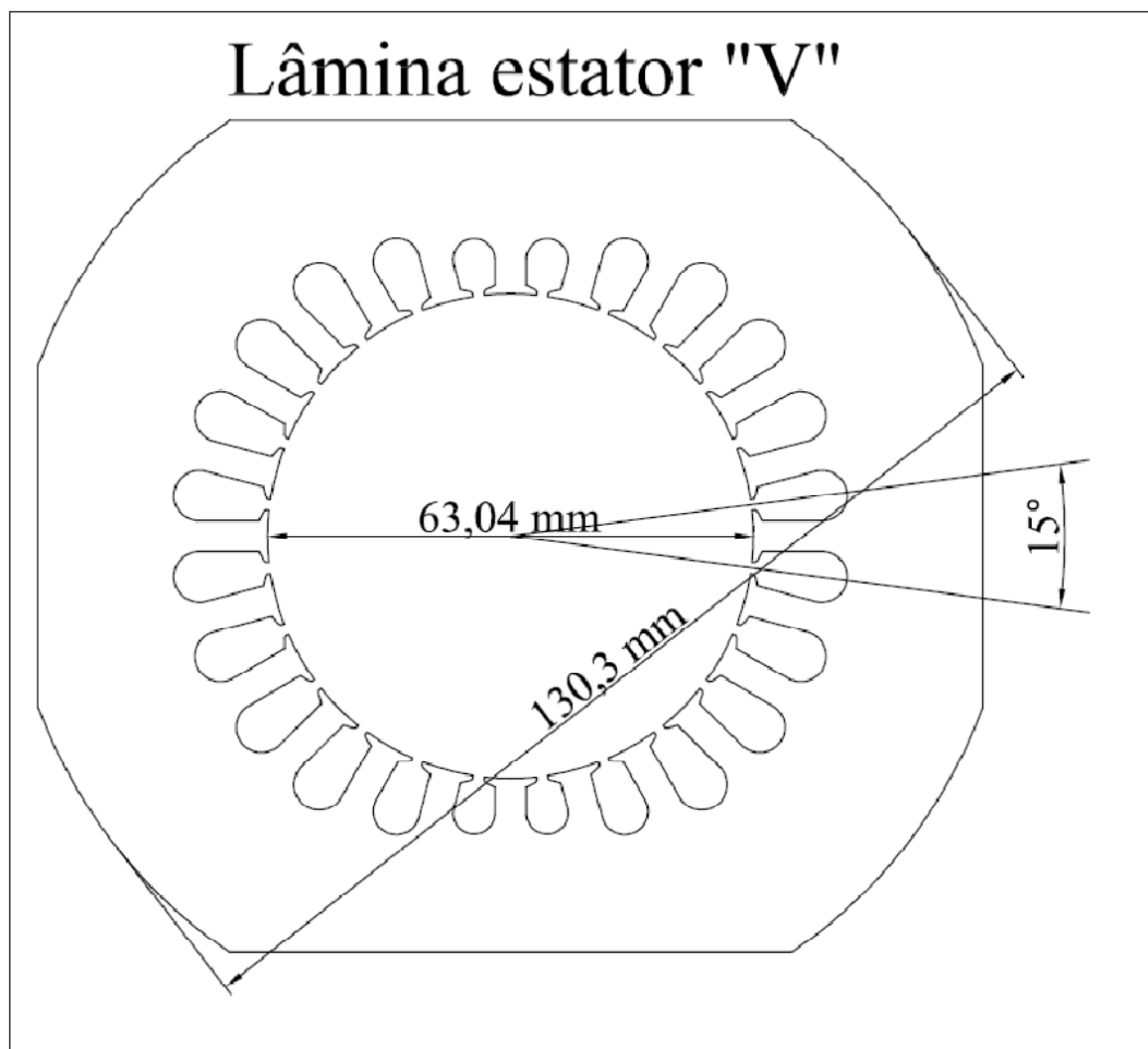
- Estudo dos padrões existentes no laço de corrente de “y” em função de “x” dos estatores, bem como o estudo das modificações desse padrão em relação a cada defeito;
- Um estudo dos efeitos da variação da frequência nos testes dos estatores.

8. Anexos

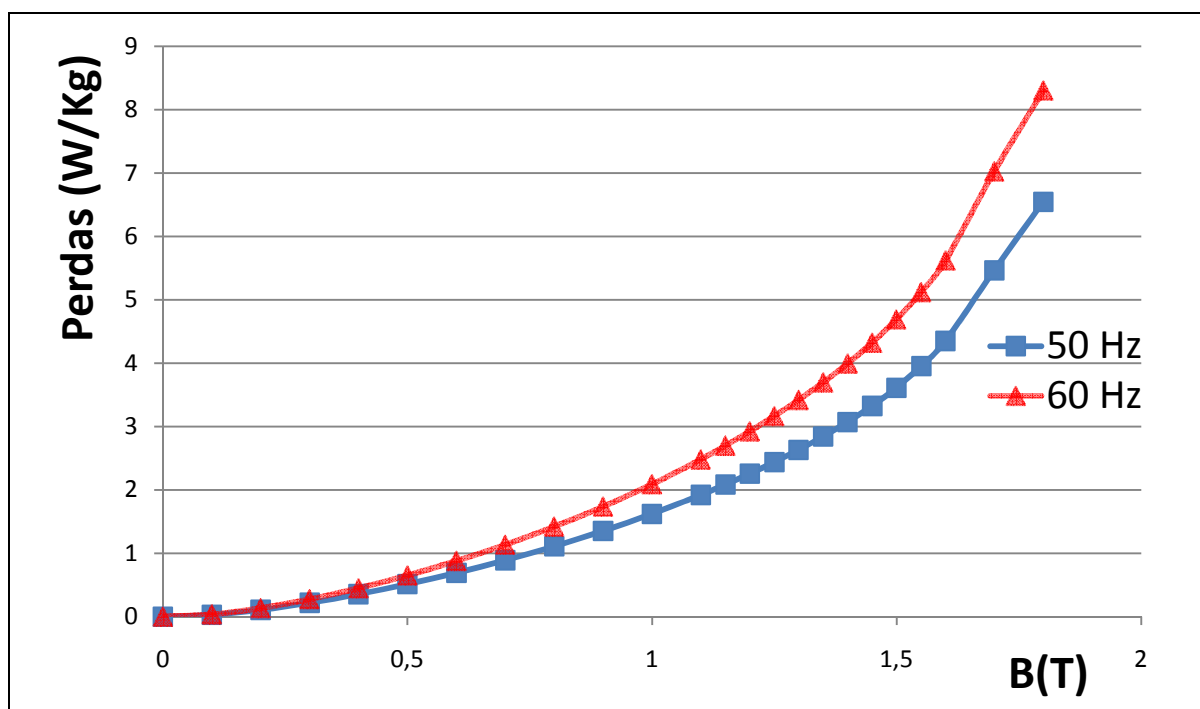
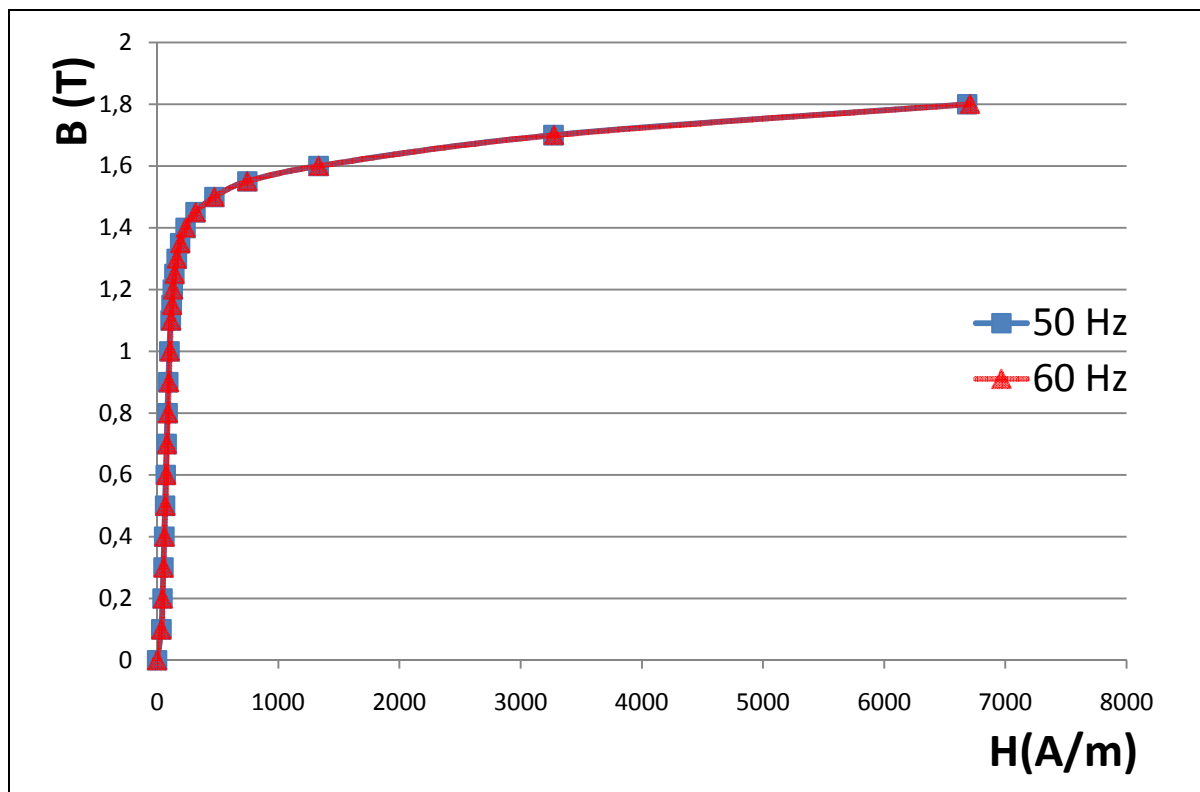
8.1 Curva utilizada na simulação do aço E230



8.2 Cotas do estator simulado e utilizado nos testes práticos



8.3 Resultado do ensaio de Epstein do aço E230 utilizado nos testes práticos

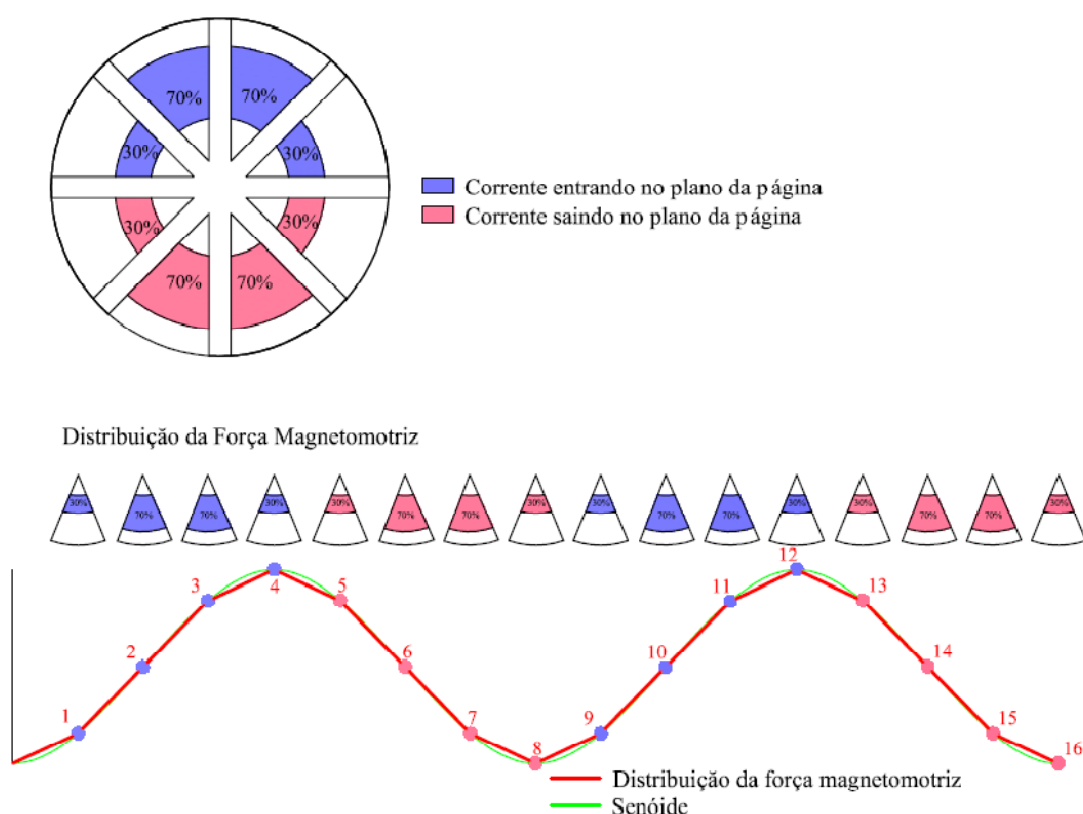


8.4 Cálculo da distribuição da força magnetomotriz

Para uma melhor compreensão de como é feito o cálculo da distribuição da força magnetomotriz observa-se a distribuição das bobinas, calculada nesta dissertação. Na figura abaixo apenas uma das fases está alimentada. A distribuição da força magnetomotriz pode ser calculada através do somatório das contribuições do NI:

$$F_{mm} = \sum N.I$$

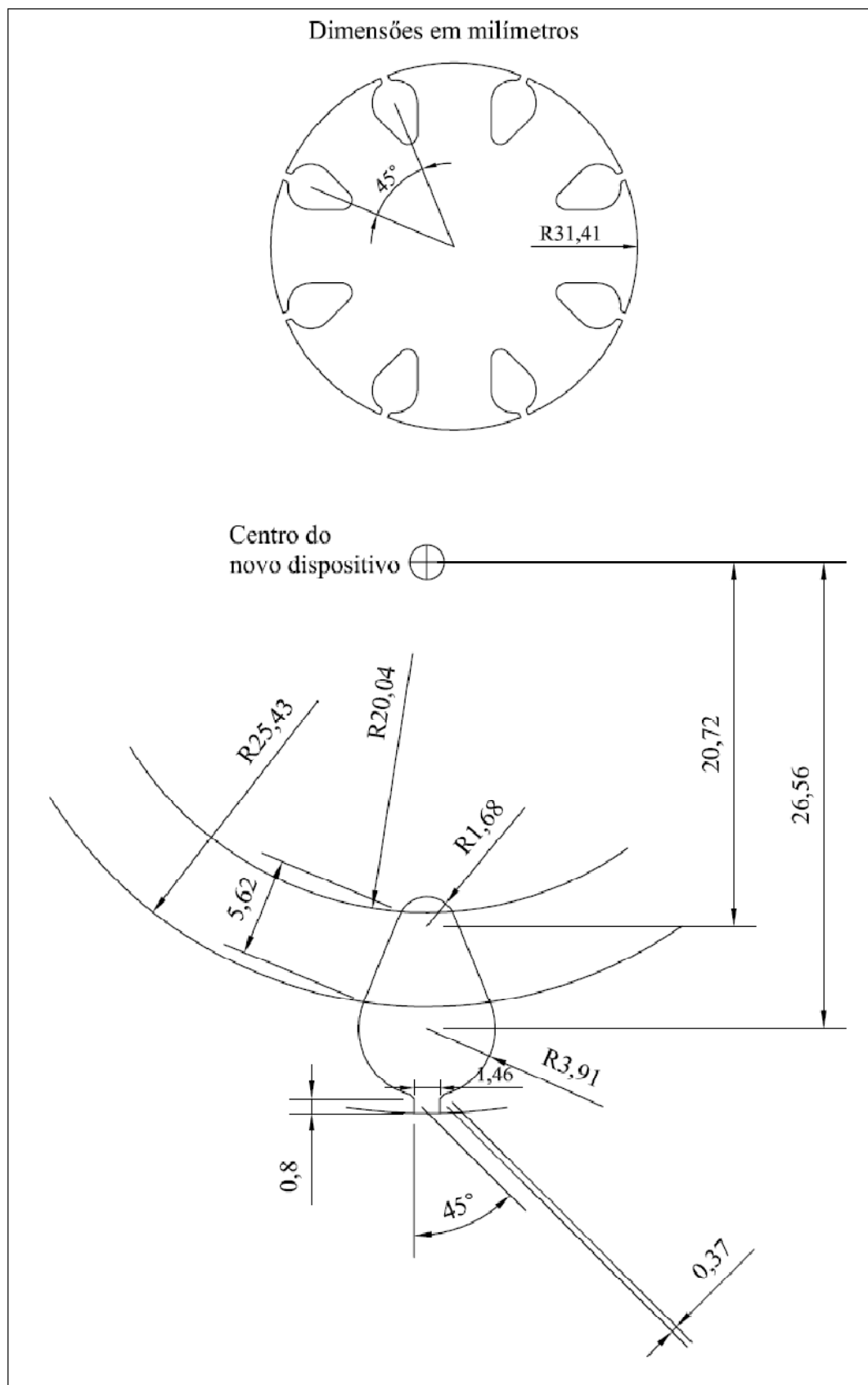
Assim, tomando-se um ponto como base e somando-se os NI vistos deste ponto teremos a distribuição da força magnetomotriz, sendo que à corrente entrando atribui-se valor positivo e à corrente saindo, valor negativo (ou vice-versa). Pelo esquema abaixo é possível perceber como se efetua este somatório.



Valores da força magnetomotriz considerando os valores das correntes em porcentagem de NI:

- | | |
|--|---|
| 1) 0,3NI | 9) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3)NI |
| 2) (0,3+0,7)NI | 10) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7)NI |
| 3) (0,3+0,7+0,7)NI | 11) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7)NI |
| 4) (0,3+0,7+0,7+0,3)NI | 12) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7+0,3)NI |
| 5) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3)NI | 13) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7+0,3-0,3)NI |
| 6) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7)NI | 14) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7)NI |
| 7) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7)NI | 15) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7)NI |
| 8) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3)NI | 16) (0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3+0,3+0,7+0,7+0,3-0,3-0,7-0,7-0,3)NI |

8.5 Cotas do novo dispositivo magnético



9. Referências Bibliográficas

- [1] BASTOS, João Pedro Assumpção. Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [2] CULLITY, B. D. Introduction to Magnetic Materials. E.U.A.: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- [3] MEURER, Evandro Jacob. Estudo das Perdas Magnéticas Interlaminares em Máquinas Elétricas. Florianópolis, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] SILVA JÚNIOR, Pedro Armando da. Bancada para Ensaaios de Materiais Ferromagnéticos em Chapa Única Sob Campos Rotacionais. Florianópolis, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] ESPÍNDOLA, Aleandro Amauri de. Avaliação das Perdas Magnéticas em Dispositivos Submetidos a Campos Magnéticos Girantes. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] SADOWSKI, Nelson; MAZENC, M. L. Relatório Interno. UFSC, GRUCAD. Florianópolis, 2003.
- [7] BATISTELA, Nelson Jhoe. Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício. Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] LABVIEW.EXE. Versão 7.1. Programa para bancos de ensaios com instrumentos virtuais. National Instruments Corporation. 2004.
- [9] EMBRACO. Relatório de Engenharia 166.97/102. Joinville, 1997.
- [10] EFCAD. Programa para Simulação e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos. UFSC, GRUCAD. Florianópolis, 2001.
- [11] BARBI, Ivo. Projetos de Fontes Chaveadas. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.
- [12] HENDERSHOT, J. R. ; MILLER, TJE. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. E.U.A.: Magna Physics e Oxford University Press, 1994.
- [13] ACESITA S.A. Aços Siliciosos. Catálogo de Fabricante. www.acesita.com.br.